

Desarrollo y validación de un prototipo funcional tipo bio-filtro para la reutilización de aguas residuales domésticas en el sector agrícola



María Ester Caro Gaviria.

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniera Ambiental

Director

Fabio Armando Fuentes Gandara, MSc

Codirector

Daniel Alcázar Franco, MSc

Facultad de Ingeniería Civil y Ambiental

Universidad de la Costa, CUC.

Octubre 2017, Barranquilla, Colombia

Nota de Aceptación

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Barranquilla, 2017

Dedicatoria

A Dios,

Por regalarme grandes bendiciones, por darme determinación y la fuerza necesaria para culminar esta etapa de mi vida

A Mis Padres,

Catalina Gaviria por el apoyo incondicional y entrega que me ha brindado, pero sobre todo por ser el motor que impulsa mi vida; Luis Emilio Caro por ser mi amigo, escucharme y animarme.

A Mi Hermano,

José caro por ser tan especial conmigo, ayudarme, apoyarme y acompañarme en cada uno de los momentos de mi vida y de mi carrera.

A Mi Esposo,

Jaime López por tantas noches de desvelo a mi lado apoyando este sueño que hoy le comparto, además de alentarme a continuar cuando desesperaba y creía que me iba a rendir.

A mi tía Kelly Gaviria por el apoyo que necesitaba para poder iniciar el camino que me llevo a mi carrera profesional.

A todos mis familiares y amigos que de una u otra forma me apoyaron y motivaron a crecer, agradezco de todo corazón esas ideas, la voz de aliento o simplemente la compañía que me dieron para alcanzar mi sueño.

Maria Ester Caro Gaviria.

Agradecimientos

A mi director Fabio Armando Fuentes Gandara y Co- Director Daniel de Jesús Alcázar Franco, por confiar en mis capacidades y compartir todo su conocimiento para sacar adelante el presente trabajo de grado producto de mucho esfuerzo, dedicación y persistencia. Y sobre todo, por brindarnos su sincera y valiosa amistad.

A mi compañera Wendy Villanueva por su colaboración y participación durante la etapa de desarrollo del proyecto.

A mi amiga Erika Arbeláez por ayudarme y brindarme el apoyo necesario para el análisis de las muestras al inicio de este proyecto.

A Jaime López Ojeda por ser ayudante, acompañante y conductor, de día, noche y madrugada siempre que se requirió para la culminación de este proyecto.

Contenido

1. Resumen.....	8
2. Introducción	12
3. Objetivos	15
3.1. Objetivo general.....	15
3.2. Objetivos específicos	15
4. Marco teórico y estado del arte.....	16
4.1. Marco teórico	16
4.1.1. El agua	16
4.1.2. Aguas residuales	18
4.1.2.1. Clasificación de las aguas residuales	18
4.1.2.2. Características del agua residual	19
4.1.2.3. Tratamiento de aguas residuales	25
4.1.3. Sistemas de filtración	26
4.1.3.1. Filtración por gravedad	27
4.1.3.2. Filtración a presión	28
4.1.3.3. Filtración en medio granular	28
4.1.3.4. Filtración a través de lechos múltiples.....	29
4.1.4. Materiales de sistemas de filtración.....	30
4.1.4.1. Arena.....	30
4.1.4.2. Grava.....	31
4.1.4.3. Carbón activado	31
4.1.4.4. Algodón.....	32
4.1.4.5. Guata (geotextil)	33
4.2. Estado del arte	34
5. Marco legal	38
6. Diseño metodológico	40
6.1. Tipo de investigación	40
6.2. Construcción del filtro	40
6.3. Evaluación de funcionamiento del filtro.....	47
6.3.1. Fase no. 1: recolección y tratamiento de las muestras	48
6.3.2. Fase no. 2: análisis de los parámetros	50
6.3.2.1. Método electrométrico para determinación de pH.....	51
6.3.2.2. Método electrométrico para determinación de la conductividad.....	52
6.3.2.3. Método de reflujo cerrado y volumetría para determinación de DQO	52

6.3.2.4. Método de incubación y electrometría para la determinación de DBO_5	53
6.3.2.5. Método volumétrico para la determinación de alcalinidad.....	54
6.3.2.6. Método del ácido ascórbico para la determinación de fosfatos	55
6.3.2.7. Método electrométrico para la determinación de salinidad	55
7. Resultados y análisis	57
7.1. Comportamiento de pH.....	59
7.2. Comportamiento de la conductividad	62
7.3. Comportamiento de salinidad	64
7.4. Comportamiento de la alcalinidad	66
7.5. Comportamiento de los fosfatos	67
7.6. Comportamiento de los detergentes.....	69
7.7. Comportamiento de la DQO	71
7.8. Comportamiento de la DBO_5	73
8. Conclusiones	76
9. Recomendaciones	78
10. Referencias.....	79
11. Anexos	86

Lista de tablas

Tabla 1. Dimensiones del filtro.....	41
Tabla 2 Características de los materiales filtrantes.....	42
Tabla 3. Codificación de las muestras	48
Tabla 4. Parámetros y métodos de análisis	50
Tabla 5. Promedio de resultados obtenidos y rango de las remociones.....	59

Lista de figuras

Figura 1. Estructura del filtro.....	42
Figura 2. Cuerpo del filtro	43
Figura 3. Láminas de guata.....	44
Figura 4. Pasos de construcción N° 5 y 6	45
Figura 5. Capa de carbón activado.....	45
Figura 6. Capa de arena	46
Figura 7. Capa de gravilla.....	46
Figura 8. Filtros para el tratamiento de las aguas grises	49
Figura 9. Muestras de agua analizadas	58
Figura 10. Comportamiento de pH	60
Figura 11. Comportamiento de la conductividad.....	62
Figura 12. Comportamiento de la salinidad.....	64
Figura 13. Comportamiento de la alcalinidad.....	66
Figura 14. Comportamiento del fosfato	68
Figura 15. Comportamiento de los detergentes	70
Figura 16. Comportamiento de la DQO.....	72
Figura 17. Comportamiento de la DBO ₅	74

Lista de anexos

Anexo 1. Registro fotográfico: Construcción del filtro	86
Anexo 2. Registro fotográfico: Tratamiento de muestras de agua gris.....	87
Anexo 3. Registro fotográfico: Tratamiento de muestras de agua gris ácida	87
Anexo 4. Registro fotográfico: Tratamiento de muestras de agua gris básica.....	88
Anexo 5. Registro fotográfico: Muestras recolectadas	89

1. Resumen

El desarrollo de un prototipo funcional tipo filtro, propuesto en el presente documento, está constituido por un sistema instaurado para filtrar y depurar aguas grises para que posteriormente puedan ser utilizadas en el sector agrícola, en la presente investigación se construyó e implemento el filtro analizando el agua resultante con la evaluación de algunos parámetros como pH, Conductividad, Salinidad, Alcalinidad, Fosfatos, Detergente, DQO y DBO₅.

Los materiales utilizados para la construcción del filtro fueron una botella de plástico, arena, carbón activado, gravilla, algodón y guata. Posteriormente se realizó una caracterización de las aguas influentes y efluentes utilizadas en el prototipo, recolectando muestras de agua domésticas a las cuales se le determinó algunos parámetros físicos químicos como son pH, conductividad, salinidad, alcalinidad, detergentes, fosfatos, demanda química de oxígeno (DQO) y demanda bioquímica de oxígeno (DBO₅).

Los resultados promedio obtenidos después de caracterizar el agua gris filtrada mostraron un pH de 5.46 unidades, la conductividad presentó un valor promedio de 3350 $\mu\text{S}/\text{cm}$, la salinidad estuvo 2.3 ppt, la alcalinidad fue de 1020 $\text{mg CaCO}_3/\text{L}$, los fosfatos conservaron un nivel cercano a 1.06 $\text{mg P}_{\text{total}}/\text{L}$, la concentración de detergentes estuvo aproximadamente en 2.82 mg/L , la DQO disminuyó a un valor cercano a 292 $\text{mg O}/\text{L}$ y la DBO₅ se redujo alrededor de 160.33 $\text{mg O}/\text{L}$.

Con este proyecto se pudo concluir que el filtro construido es una herramienta que puede ser utilizada en el sector agrícola, debido a la alta capacidad de remoción en algunos de los parámetros determinados entre los cuales destacaron la DQO y DBO₅ con altos niveles de remoción con porcentajes de 80 y 88 % respectivamente; además teniendo en cuenta las

variaciones de las muestras analizadas también se logró establecer que el agua gris filtrada fue la que mostro un mejor comportamiento.

Palabras claves. *Filtro, aguas grises, agrícola, guata.*

Abstract

The development of a functional prototype type filter, proposed in this document, is constituted by a system installed to filter and purify gray water so that later it can be used in the agricultural sector, in the present investigation the filter was built and implemented analyzing the water resulting from the evaluation of some parameters such as pH, Conductivity, Salinity, Alkalinity, Phosphates, Detergent, COD and BOD₅.

The materials used for the construction of the filter were a plastic bottle, sand, activated carbon, gravel, cotton and wadding. Subsequently, a characterization of the influent and effluent waters used in the prototype was carried out, collecting domestic water samples to which certain physical chemical parameters were determined such as pH, conductivity, salinity, alkalinity, detergents, phosphates, chemical oxygen demand (COD) and biochemical oxygen demand (BOD₅).

The average results obtained after characterizing the filtered gray water showed a pH of 5.46 units, the conductivity presented an average value of 3350 $\mu\text{S} / \text{cm}$, the salinity was 2.3 ppt, the alkalinity was 1020 mg CaCO_3 / L , the phosphates conserved a level close to 1.06 mg $\text{P}_{\text{total}} / \text{L}$, the detergent concentration was approximately 2.82 mg / L, the COD decreased to a value close to 292 mg O / L and the BOD₅ was reduced around 160.33 mg O / L.

With this project it was possible to conclude that the built filter is a tool that can be used in the agricultural sector, due to the high removal capacity in some of the parameters determined among which the COD and BOD₅ with high levels of removal with percentages stood out of 80 and 88% respectively; also taking into account the variations of the samples analyzed it was also possible to establish that the filtered gray water was the one that showed a better behavior.

Keywords. *Filter, gray water, agricultural, wadding.*

2. Introducción

A medida que las sociedades se desarrollan enfrentan problemas cada vez más complejos; en ese sentido, surge la necesidad de tomar decisiones de manera informada, basadas en conocimiento, contexto local y consenso social (Akdeniz & Bagriyanik, 2016).

A nivel internacional el aumento de las descargas de aguas residuales domésticas resultantes del incremento poblacional en gran parte en los centros urbanos, afectan de manera gradual o de inmediato el entorno; constituyéndose en uno de los problemas ambientales más críticos y de mayor interés por parte de los ambientalistas (Liu et al., 2014).

En ese mismo sentido, los recursos de agua dulce se han visto reducidos por la contaminación, unos dos millones de toneladas de desechos, son expulsados diariamente en aguas receptoras, incluyendo residuos industriales como por ejemplo, los colorantes generados en el procesamiento de alfombras, alimentos, caucho, papeles, plásticos, cosméticos y tratamiento de textiles, éstos son usados impropriamente y en grandes cantidades generando volúmenes considerables de residuos, lo cual también amerita una atención especial debido a que imparten color a los cuerpos de agua receptores tales como ríos y lagos, interfiriendo en la penetración de la luz a los cuerpos de agua, alterando la demanda de oxígeno disuelto, disminuye la actividad fotosintética, e inhiben la reacción de los agentes oxidantes (Castellar et al., 2013). Adicional a esto se encuentra los constantes vertimientos a los humedales de fertilizantes, herbicidas, fungicidas y plaguicidas que suelen utilizar en las diferentes etapas de los cultivos para la erradicación de organismos que cada vez son más difíciles de eliminar y generan incrementos en los costos de producción y una disminución en los rendimientos de los cultivos (Mengistie et al., 2017).

Colombia no está exenta de la problemática anterior, como factor adicional se evidencia la poca reutilización de aguas residuales muchas veces sin tratamiento previo genera riesgos en la salud pública (Silva et al., 2008). Teniendo en cuenta la demanda hídrica nacional, el sector agrícola consume 16760.3 millones de m³ correspondiente al 46.6%, el sector de energía 7,738.6 equivalente al 21.5%, uso doméstico 2963.4 lo que equivale al 8.2%, acuícola 1654.1 correspondiente al 4.6%, sector pecuario 3049.4 correspondiente al 8.5%, el sector industria 2106 equivalente al 5.9%, sector de hidrocarburos 592.8 equivalente al 1.6%, sector minería 640.6 equivalente al 1.8% y servicios con 481.8 correspondiente al 1.3% (IDEAM, 2015).

Por otro lado, Colombia tiene una superficie irrigada con aguas residuales de 1.230.193 ha, con 27% de agua residual tratada y 73% sin tratar, por lo general diluida con aguas superficiales; al igual que sucede en toda América Latina, no se cuenta con información completa y confiable sobre el tema del reúso y solamente 8% del total de aguas residuales que se producen diariamente son tratadas (Lopera & Campos, 2011).

De acuerdo al informe de la ONU, sobre el manejo de los recursos hídricos, el planteamiento sobre la crisis del agua y los desafíos por enfrentar en las próximas décadas un desarrollo sostenible con relación al uso del agua (UNESCO, 2003), surge la necesidad de plantear estrategias de fácil acceso y funcionales, diferentes a las fuentes de agua dulce para el riego, que permitan contribuir con una mejor administración de dicho recurso en un contexto nacional e internacional.

Por lo que la CEPAL en la agenda 2030 y los objetivos de desarrollo sostenible contempla diferentes objetivos encaminados hacia la sostenibilidad económica, social y ambiental; dentro de los cuales tuvo en cuenta la disponibilidad de agua de calidad, reduciendo la contaminación en general, imprimiendo un concepto de reciclaje y reutilización sin generar otros riesgos.

Debido a lo anterior se hace necesario desarrollar la actual investigación en aras de contribuir como una alternativa de desarrollo sostenible en el manejo del agua, garantizando a su vez que este recurso sea utilizado eficazmente, incentivando así su ahorro, con la reutilización de las aguas grises domésticas con calidad, para el riego y preservación de jardines y pequeños cultivos que beneficien la salud humana y la oxigenación del medio ambiente.

3. Objetivos

3.1.Objetivo general

- Evaluar un prototipo tipo filtro para la reutilización de aguas grises en el sector agrícola.

3.2.Objetivos específicos

- Diseñar e implementar un modelo de filtro para la reutilización de las aguas grises para el riego de pequeños cultivos.
- Caracterizar las aguas grises antes y después de filtrada teniendo en cuenta la normatividad vigente (Resolución 1207 de 2014, Art.7) donde se estipula las disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas.
- Analizar la remoción de cada uno de los parámetros analizados en las aguas filtradas.

4. Marco teórico y estado del arte

4.1.Marco teórico

4.1.1. El agua

La disponibilidad de agua promedio anual en el mundo es de aproximadamente 1386 millones de km³ de los cuales el 97.5% es agua salada y sólo el 2.5%, es decir 35 millones de km³, es agua dulce. De esta cantidad casi el 70% no está disponible para consumo humano debido a que se encuentra en forma de glaciares, nieve o hielo (Conagua, 2011).

Del agua que técnicamente está disponible para consumo humano, sólo una pequeña porción se encuentra en lagos, ríos, humedad del suelo y depósitos subterráneos relativamente poco profundos, cuya renovación es producto de la infiltración. Mucha de esta agua teóricamente utilizable se encuentra lejos de las zonas pobladas, lo cual dificulta o encarece su utilización efectiva (Conagua, 2011).

El agua es la única sustancia que existe a temperaturas ordinarias en los tres estados de la materia: sólido, líquido y gas. El agua es, quizá el compuesto químico más importante en las actividades del hombre y también más versátil (Pérez, 2011).

Es uno de los agentes ionizantes más conocidos. Puesto que todas las sustancias son de alguna manera solubles en agua, se le conoce frecuentemente como el disolvente universal. El agua combina con ciertas sales para formar hidratos, reacciona con los óxidos de los metales formando ácidos y actúa como catalizador en muchas reacciones químicas importantes (Pérez, 2011).

El agua como sólido o hielo se encuentra en los glaciares y los casquetes polares, así como en las superficies de agua en invierno; también en forma de nieve, granizo y escarcha, y en las nubes formadas por cristales de hielo. Existe en estado líquido en las nubes de lluvia formadas por gotas de agua, y en forma de rocío en la vegetación. Además, cubre las tres cuartas partes de la superficie terrestre en forma de pantanos, lagos, ríos, mares y océanos. Como gas, o vapor de agua, existe en forma de niebla, vapor y nubes. El vapor atmosférico se mide en términos de humedad relativa, que es la relación de la cantidad de vapor de agua en el aire a una temperatura dada respecto a la máxima que puede contener a esa temperatura (Pérez, 2011).

También está presente en la porción superior del suelo, en donde se adhiere, por acción capilar, a las partículas del mismo. En este estado, se le denomina agua ligada y tiene unas características diferentes del agua libre. Por influencia de la gravedad, el agua se acumula en los intersticios de las rocas debajo de la superficie terrestre formando depósitos de agua subterránea que abastecen a pozos y manantiales, y mantienen el flujo de algunos arroyos durante los períodos de sequía (Pérez, 2011).

El agua es el componente principal de la materia viva. Constituye del 50 al 90% de la masa de los organismos vivos. El protoplasma, que es la materia básica de las células vivas, consiste en una disolución de grasas, carbohidratos, proteínas, sales y otros compuestos químicos similares en agua. El agua actúa como disolvente transportando, combinando y descomponiendo químicamente esas sustancias. La sangre de los animales y la savia de las plantas contienen una gran cantidad de agua, que sirve para transportar los alimentos y desechar el material de desperdicio. El agua desempeña también un papel importante en la descomposición metabólica

de moléculas tan esenciales como las proteínas y los carbohidratos. Este proceso, llamado hidrólisis, se produce continuamente en las células vivas (Pérez, 2011).

4.1.2. Aguas residuales

Por aguas residuales se entiende a la acción y efecto en la que el hombre introduce materias contaminantes, formas de energía o inducir condiciones en el agua de modo directo o indirecto; implica alteraciones perjudiciales de su calidad con relación a los usos posteriores o con su función ecológica. Estas aguas que provienen del sistema de abastecimiento de agua de una población, después de haber sido modificadas por diversos usos en actividades domésticas, industriales y comunitarias. El agua residual está compuesta de componentes físicos, químicos y biológicos; es una mezcla de materiales orgánicos e inorgánicos, suspendidos o disueltos (Díaz et al., 2012).

De manera específica, las aguas residuales domésticas hacen referencia a aquellas utilizadas con fines higiénicos (baños, cocinas, lavanderías, etc.), consisten básicamente en residuos humanos que llegan a las redes de alcantarillado por medio de descargas de instalaciones hidráulicas de la edificación también en residuos originados en establecimientos comerciales, públicos y similares. Se estima que las aguas residuales domésticas están constituidas en un elevado porcentaje (en peso) por agua, cerca de 99.9 % y apenas 0.1 % de sólidos suspendidos, coloidales y disueltos, esta pequeña fracción de sólidos es la que presenta los mayores problemas en su tratamiento y su disposición (Díaz et al., 2012).

4.1.2.1. Clasificación de las aguas residuales

Dentro de las aguas residuales se encuentra la siguiente clasificación según diversos orígenes:

Aguas residuales domésticas o aguas negras: Proviene de las heces y orina humanas, del aseo personal, la cocina y de la limpieza de la casa. Contienen gran cantidad de materia orgánica y microorganismos, así como restos de jabones, detergentes y grasas (Castro & Orozco, 2015).

Aguas blancas: Pueden ser de procedencia atmosférica (lluvia, nieve o hielo) o del riego y limpieza de calles, parques y lugares públicos. En aquellos lugares en que las precipitaciones atmosféricas son muy abundantes, éstas pueden evacuarse por separado para que no saturen los sistemas de depuración (Castro & Orozco, 2015).

Aguas residuales industriales: Se originan en los procesamientos realizados en fábricas y establecimientos industriales; contienen aceites, detergentes, antibióticos, ácidos, grasas, entre otros productos y subproductos de origen mineral, químico, vegetal o animal. Su composición es muy variable, dependiendo de las diferentes actividades industriales (Castro & Orozco, 2015).

Aguas residuales agrícolas: proceden de las labores agrícolas en zonas rurales. Estas aguas suelen participar en cuanto a su origen, de las aguas urbanas que se utilizan, en numerosos lugares, para riego agrícola con o sin tratamiento previo (Castro & Orozco, 2015).

4.1.2.2. Características del agua residual

Las aguas residuales provienen del sistema de suministro de agua de una población, después de haber sido modificadas por diversos usos en actividades domésticas, industriales y comunitarias. El agua residual está compuesta por componentes físicos, químicos y biológicos; es una mezcla de materiales orgánicos e inorgánicos, suspendidos o disueltos (Díaz et al., 2012).

Las aguas residuales presentan una gran cantidad de compuestos y contaminantes que tienen una acción compleja sobre el medio ambiente, afectando el desarrollo natural de los ecosistemas por el cambio de condiciones (Forero et al., 2005).

Entre las características físicas del agua residual se distinguen algunas como los sólidos suspendidos, sedimentables y disueltos, olor, temperatura, color, turbidez y densidad.

- **Sólidos Totales:** Son materiales que se pueden encontrar suspendidos o disueltos en el agua, y que pueden ser determinados mediante la materia obtenida una vez que se someten las muestras a evaporación entre 103 y 105 °C excluyendo las pérdidas durante el proceso (Castro & Orozco, 2015).
- **Olor:** Compuestos químicos presentes en el agua como los fenoles, diversos hidrocarburos, cloro, materias orgánicas en descomposición o 49 esencias liberadas por diferentes algas u hongos pueden dar olores muy fuertes al agua, aunque estén en muy pequeñas concentraciones (Pozo, 2012).
- **Temperatura:** La temperatura del agua tiene una gran importancia en el desarrollo de los diversos procesos que en ella se realizan, de forma que un aumento de la temperatura modifica la solubilidad de las sustancias, aumentando la de los sólidos disueltos y disminuyendo la de los gases. Un aumento anormal (por causas no climáticas) de la temperatura del agua, suele tener su origen en el vertido de aguas utilizadas en procesos industriales de intercambio de calor. La temperatura se determina mediante termometría realizada “in situ” (Aznar, 2000).
- **Color:** Es la capacidad de absorber ciertas radiaciones del espectro visible. La presencia de color en las aguas residuales principalmente se debe a la existencia de materia orgánica

proveniente de los suelos vegetales, como es el caso de los ácidos húmicos que proporcionan un color amarillento; el hierro que aporta colores rojizos y el manganeso que le proporciona tonalidades negras (Perez et al., 2013).

Al analizar aguas residuales, es necesario determinar dos tipos de color: el aparente y el verdadero. Se conoce como color aparente, al proporcionado tanto como por la materia disuelta como por las sustancias en suspensión. Por otro lado, el color verdadero o real, conocido como aquel que se presenta después de que la muestra fue sometida a procesos de filtración o centrifugación para eliminar la turbidez (Perez et al., 2013).

- **Turbidez:** Se debe a la presencia de materias en suspensión, finamente divididas; arcillas, limos, partículas de sílice, materias inorgánicas, entre otras. La determinación de la turbidez tiene un gran interés como parámetro de control en aguas contaminadas y residuales. Se puede evaluar en el campo o en el laboratorio (Castro & Orozco, 2015).

Por otro lado las aguas residuales pueden ser estudiadas según sus características químicas en tres partes; materia orgánica, materia inorgánica y los gases que por lo general son típicos en estas aguas.

- **Materia Orgánica:** De acuerdo a los sólidos presentes en agua residual de concentración media se puede decir que aproximadamente el 75% de los sólidos suspendidos y el 40% de los sólidos filtrables son orgánicos, los cuales provienen en gran parte de plantas y animales, estos compuestos orgánicos están formados por la combinación de carbono, oxígeno e hidrógeno y en algunas ocasiones de nitrógeno (Castro & Orozco, 2015).

- **Materia Inorgánica:** las concentraciones de constituyentes inorgánicos aumentan debido al proceso de evaporación que elimina un porcentaje del agua superficial y deja las sustancias inorgánicas en el agua (Castro & Orozco, 2015).
- **pH:** Es una medida de la concentración de iones hidrógeno y es una medida de la naturaleza ácida o alcalina de la solución acuosa que puede afectar los usos específicos del agua. La mayoría de las aguas naturales tienen un pH que varía entre 6 y 8, mientras que en las aguas residuales es variable y puede corregirse por neutralización. Esta medición se lleva a cabo empleando un potenciómetro calibrado (Perez et al., 2013).
- **Cloruros:** Los cloruros son una de las sales que están presentes en mayor cantidad en todas las fuentes de abastecimiento de agua y de drenaje. El sabor salado del agua, producido por los cloruros, es variable y dependiente de la composición química del agua. Los cloruros son aniones que generalmente se encuentran contenidos en aguas naturales; La magnitud de su concentración es muy variable. Los cloruros fácilmente solubles, no participan en los procesos biológicos, no desempeñan ningún papel en los fenómenos de descomposición y no sufren modificaciones (Perez et al., 2013).
- **Nitrógeno:** El nitrógeno se presenta en muy diferentes formas químicas en las aguas naturales y contaminadas. En los análisis habituales se suele determinar el NTK (nitrógeno total Kjendahl) que incluye el nitrógeno orgánico y el amoniacal. El contenido en nitratos y nitritos se da por separado. Tienen un papel fundamental en el deterioro de las masas acuáticas. Su presencia en las aguas residuales es debida a los detergentes y fertilizantes, principalmente. El nitrógeno orgánico también es aportado a las aguas residuales a través de las excretas humanas (Pozo, 2012).

El predominio de los nitratos indica que el residuo se ha estabilizado con respecto a su demanda de oxígeno. Los nitratos, sin embargo, utilizados por las algas y otros organismos acuáticos para formar proteínas y, por ello, puede necesitarse la remoción del nitrógeno para prevenir dichos crecimientos (Pozo, 2012).

- **Fósforo:** El fósforo en aguas residuales se encuentra principalmente como fosfatos y en formas orgánicas. La contaminación de agua por este elemento tiene su fuente principal en el uso de productos de limpieza con compuestos fosforados como principios activos. El fósforo es esencial para el crecimiento de los organismos y puede ser un nutriente limitante de la productividad primaria. En concentraciones elevadas por la incorporación de aguas residuales o tratadas, estimula el crecimiento acelerado de macro y microorganismos, provocando eutrofización (Romero et al., 2009).
- **Azufre:** Está presente tanto en el agua potable como en las aguas residuales, es necesario contar con él, para la síntesis de proteínas, el mismo que será liberado en la degradación de estas. Los sulfatos se reducen a sulfuros y a sulfuros de hidrógenos bajo la acción de bacterias en ausencia de oxígeno (Castro & Orozco, 2015).
- **Gases:** Dentro de los gases que están presentes en mayor proporción en las aguas residuales están el oxígeno, nitrógeno, dióxido de carbono, amoníaco, sulfuro de hidrógeno y metano (Castro & Orozco, 2015).
- **Oxígeno disuelto:** Este parámetro en aguas naturales y residuales, depende de la actividad física, química y bioquímica del sistema de aguas. En agua pura, a la temperatura ambiente, el oxígeno se disuelve a una concentración aproximada de 8.5 mg/L. La solubilidad disminuye conforme aumenta tanto la cantidad de sólidos disueltos así como la temperatura, pero se incrementa al aumentar la presión. El análisis de oxígeno disuelto es una prueba

clave en la contaminación del agua, y en el control del proceso de tratamiento de aguas residuales. En aguas industriales, el oxígeno disuelto tiene un interés primordial debido a su relación con las reacciones de corrosión. Incluso, cantidades pequeñas de oxígeno en el agua de la caldera y en el agua de alimentación pueden provocar una corrosión severa (Perez et al., 2013).

- **Metano:** Este gas resulta de la descomposición anaerobia de la materia orgánica presente en el agua residual, es un hidrocarburo combustible de gran valor energético, inodoro e incoloro (Castro & Orozco, 2015).

Además los principales parámetros biológicos que se pueden encontrar en las aguas residuales son los siguientes: demanda bioquímica de oxígeno, demanda química de oxígeno y organismos patógenos presentes.

- **Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO):** Es el grado de consumo de oxígeno durante la oxidación de contaminantes en el agua, llevada a cabo por microorganismos. Este parámetro se determina midiendo la cantidad de oxígeno utilizado por microorganismos durante un período de 5 días. La prueba de DBO por sí misma es el parámetro de mayor significación cuando se trata de determinar la carga contaminante que pueden crear los desechos domésticos e industriales al descargarse en cursos naturales de aguas en los cuales se requiere persistan condiciones aerobias. Es importante para medir la capacidad de autodepuración de los cuerpos receptores de vertimientos domésticos e industriales (Hidalgo & Mejia, 2010).
- **Demanda Química de Oxígeno (DQO):** Medida de la cantidad de oxígeno requerido para oxidación química de la materia orgánica del agua residual, usando como oxidantes sales inorgánicas de permanganato o dicromato en un ambiente ácido y a altas temperaturas (Hidalgo & Mejia, 2010).

- **Organismos Patógenos:** Estos organismos están presentes en las aguas residuales y pueden proceder de desechos humanos infectados o que tengan cierta enfermedad. Entre las enfermedades típicas que causan los organismos patógenos están la tifoidea, diarrea y cólera (Castro & Orozco, 2015).

Los organismos patógenos están presentes en las aguas residuales en cantidades pequeñas y resultan difíciles de identificar, razón por la cual se emplea el organismo Coliformes como indicador ya que su presencia es mayor y de fácil comprobación (Castro & Orozco, 2015).

4.1.2.3.Tratamiento de Aguas Residuales

Cuando se habla de tratamiento de aguas residuales se espera eliminar o reducir la concentración de los contaminantes buscando alcanzar valores máximos permisibles de acuerdo a las normas y estándares nacionales o internacionales. Conociendo la diversidad de contaminantes que pueden presentarse en las aguas residuales, la forma de tratarlos es muy amplia, y las técnicas que se aplican en estos procesos son diversas (Diaz et al., 2012).

Las aguas residuales se generan en residencias, instituciones y locales comerciales e industriales. Éstas pueden ser tratadas dentro del sitio en el cual son generadas (por ejemplo: tanques sépticos u otros medios de depuración) o ser recogidas y transportadas mediante una red de tuberías para posteriormente ser bombeadas a una planta de tratamiento municipal. Los esfuerzos para recolectar y tratar las aguas residuales domésticas de la descarga están por lo general sujetos a regulaciones y estándares nacionales. A menudo, ciertos contaminantes de origen industrial presentes en las aguas residuales requieren procesos de tratamiento especializado (Apaza, 2013).

Por lo general, el tratamiento de aguas residuales se inicia por la separación física de sólidos grandes de la corriente de aguas domésticas o industriales, empleando un sistema de rejillas o

mallas, aunque también pueden ser triturados por un equipo especial; posteriormente se aplica un desarenado (separación de sólidos pequeños muy densos, como la arena) seguido de una sedimentación primaria (o tratamiento similar) que separa los sólidos suspendidos existentes en el agua residual (Apaza, 2013).

En cuanto a la eliminación remoción de metales disueltos se utilizan reacciones de precipitación. A continuación se prosigue con la conversión progresiva de materia biológica disuelta en una masa sólida usando bacterias adecuadas, generalmente presentes en estas aguas. Cuando la masa biológica es separada o removida (proceso llamado sedimentación secundaria), el agua tratada puede experimentar procesos adicionales o tratamiento terciario como desinfección, filtración, entre otros. El efluente final puede ser descargado o reintroducido de vuelta a un cuerpo de agua natural (corriente, río o bahía) u otro ambiente (terreno superficial, subsuelo, etc.) (Apaza, 2013).

4.1.3. Sistemas de filtración

La remoción de sólidos suspendidos, al pasar el agua a través de un medio poroso, se debe principalmente a una acción mecánica. Muchas partículas no pasan por los intersticios del filtro a causa de su tamaño. Esta operación sola no logra una clarificación completa. Los sólidos son eliminados o removidos por la formación de películas gelatinosas alrededor de los granos del medio filtrante. En algunos filtros el recubrimiento de los granos se da por una acción biológica, la cual es más notoria en los filtros lentos de arena, en los cuales se forma una capa limosa sobre la superficie del lecho filtrante. La resistencia de la capa a la rotura usualmente se debe a su relación con los organismos microscópicos (Rivera & Valiente, 2003).

Los sólidos para penetrar la profundidad del lecho de arena, depende, en gran parte, del flujo de filtración, el grado de pre-tratamiento, así como de las dimensiones y graduación de la porosidad del medio filtrante. A medida que pasa el tiempo, el filtro aumenta su eficiencia; por lo que la materia floculada llena los vacíos del lecho filtrante y la capa artificial produciendo intersticios más finos que ayudan en la remoción de sólidos solubles y de los sólidos suspendidos debido a que se reduce la dimensión de los canalitos en el medio filtrante (Rivera & Valiente, 2003).

En los siguientes ítems se presentan diferentes tipos de filtración dando una corta descripción de sus características.

4.1.3.1.Filtración por gravedad

Los filtros se pueden encontrar o elaborar en formas rectangulares o circulares y se construyen con diversos materiales como madera, acero, o concreto. Cuentan en el fondo con un sistema de drenaje que recoge el agua filtrada y distribuye el agua de retrolavado (Rivera & Valiente, 2003).

El agua entra por la parte superior y pasa hacia abajo a través del lecho filtrante. El agua filtrada fluye por la técnica de drenaje inferior y descarga de ahí al sistema que la contendrá. Para limpiar la unidad, se detiene el proceso de filtración y se alimenta con agua filtrada de abajo hacia arriba por retrolavado. Son llamados filtros lentos por que trabajan por medio de la fuerza de gravedad que se encarga de impulsar el agua hacia por todo el lecho, lo cual los hace un poco menos efectivos en cuanto a volumen de agua tratada que se obtiene de éstos (Rivera & Valiente, 2003).

4.1.3.2.Filtración a presión

Los filtros a presión tienen su material filtrante en un tanque cerrado y el agua fluye a través del mismo de manera forzada filtrando bajo una presión relativamente alta. Maneja algunas similitudes con los filtros de gravedad. Por lo general son utilizados en las industrias (calderas) debido a que pueden instalarse en líneas a presión sin necesidad de utilizar bombeo adicional (Rivera & Valiente, 2003).

Este tipo de filtro se construye de dos formas verticales y horizontales teniendo en cuenta las necesidades del proceso y la calidad del agua a tratar. Por lo general se requieren procesos previos como tanques de sedimentación debido al corto tiempo en que está en contacto el agua con los materiales de filtración (Rivera & Valiente, 2003).

4.1.3.3.Filtración en medio granular

La filtración en medio granular es, por lo general, aplicable en la eliminación de sólidos suspendidos en el intervalo de 5 a 50 mg/L. Son utilizados frecuentemente en lugares de fuentes de agua cruda con turbidez muy baja, como método de eliminación y remoción de sólidos en especial en aguas que resultan de procesos industriales (Rivera & Valiente, 2003).

Los mecanismos físicos y químicos permiten la eliminación por filtración de los sólidos; dentro de estos mecanismos se encuentra la adsorción y el colado. (Rivera & Valiente, 2003).

La adsorción va de la mano de las características físicas de los sólidos en suspensión y del medio filtrante. Esta es una función del tamaño de grano del medio filtrador y de las propiedades del flóculo, como el tamaño, la resistencia al esfuerzo cortante y adhesividad. También afectan a la adsorción las características químicas de los sólidos suspendidos, el agua y el medio filtrante. De los diferentes tipos de medios de filtración empleados para eliminar sólidos suspendidos, el

más común es la arena de sílice, aunque la antracita triturada también se usa con frecuencia (Rivera & Valiente, 2003).

4.1.3.4.Filtración a través de lechos múltiples

Un lecho de medios apilados o de dos capas (medio dual) es una respuesta para proporcionar una filtración de gruesa a fina en un patrón de flujo descendente. Los dos materiales seleccionados tienen distinto tamaño de grano y diferente gravedad específica (Rivera & Valiente, 2003).

Así como el medio dual de grueso a fino es más efectivo que el filtro de un solo medio, pueden lograrse mejoras posteriores introduciendo bajo la arena un tercer medio de grano más pequeño y más pesado. Este filtro opera con flujos grandes y ofrece una penetración más profunda y jornadas más largas para el filtro que los filtros de medio único o de medio dual. Para diseñar un filtro de rendimiento máximo, lo primero que debe tomarse en cuenta es la calidad deseada del efluente (Rivera & Valiente, 2003).

Es crítica la velocidad de flujo a través del filtro, ya que limita el rendimiento y determina el número de filtros necesarios. De ordinario, a medida que el flujo aumenta también lo hace la penetración en el filtro. La velocidad de flujo está limitada por la presión y por las dimensiones del medio. A medida que el medio empieza a cargarse con sólidos, la velocidad neta para un flujo dado aumenta hasta que las fuerzas cortantes rompen los sólidos, que escapan por el efluente (Rivera & Valiente, 2003).

4.1.4. Materiales de sistemas de filtración.

Muchas sustancias han sido empleadas y se usan actualmente, para el filtrado de agua, a continuación se presentan las características y propiedades de los materiales filtrantes utilizados en esta investigación:

4.1.4.1. Arena

La arena es el material más empleado para la filtración tanto en los procesos lentos como en los rápidos, pero en los últimos años se han venido utilizando también el cuarzo, la antracita y otros materiales triturados mecánicamente (Otero, 2009).

La característica del medio filtrante que más afecta al proceso de filtración es el tamaño del grano. El tamaño del grano afecta tanto a la pérdida de carga en la circulación del agua a través del filtro, como al gradiente de velocidad de dicho aumento durante el ciclo de filtración. Si el tamaño de grano efectivo del medio filtrante es demasiado pequeño, la mayor parte de la fuerza actuante se empleará para vencer la resistencia de fricción provocada por el lecho filtrante, mientras que si el diámetro efectivo es demasiado grande, muchas de las partículas de menor tamaño presentes en el agua a filtrar, pasarán directamente a través del filtro sin ser eliminadas (Otero, 2009).

La arena fina da una calidad mejor para el efluente, pero no permite la penetración de sólidos en el lecho. Además, la sedimentación superficial elevada que tiene lugar con el lecho de arena fina tiende a compactarse y es difícil de arrastrarla por lavado. Las arenas más gruesas, darán tiempos de funcionamiento más largos, calidad del efluente mejor, y puede lavarse más fácilmente, pero se requiere un caudal de agua de lavado superior para obtener una expansión comparable durante el lavado. Las arenas más gruesas tienen la ventaja de que la operación de

lavado es más fácil, los ciclos de filtración son más largos, calidades de efluentes casi comparables y menor acumulación de lodos (Otero, 2009).

4.1.4.2. Grava

Este tipo de rocas son las llamadas rocas sedimentarias que son las formadas por capas en paralelo, de partículas sólidas unidas por compuestos que actúan como el cemento, los cuales pueden ser: sílice, carbonato de calcio y óxido de hierro, los cuales sufren alteraciones posteriores provocadas por la acción atmosférica (estas perturbaciones pueden ser de origen químico o mecánico). En cuanto a la calidad de arena y grava varía mucho, desde yacimientos que tienen una buena calidad, hasta lugares que poseen una calidad inferior (Rivera & Valiente, 2003).

La grava ayuda en la bioacumulación en las paredes de la rocas, reproduciendo una flora bacteriana que actúa en la depuración de las aguas en un sistema de tratamiento natural (Pozo, 2012).

4.1.4.3. Carbón Activado

El carbón activado es un producto comercial con superficie específica alta, de carácter microporoso y una alta capacidad de adsorción, por lo que elimina una amplia variedad de contaminantes orgánicos e inorgánicos y metales pesados presentes en medios acuosos (Vera et al., 2016).

El sólido universalmente utilizado en el tratamiento de aguas es el carbón activo, aunque recientemente se están desarrollando diversos materiales sólidos que mejoran, en ciertas aplicaciones, las propiedades del carbón activo (Rodríguez et al., 2006).

Hay dos formas clásicas de utilización de carbón activo, con propiedades diferentes y utilizadas en diferentes aplicaciones (Rodríguez et al., 2006):

Carbón activado granular (GAC). Se suele utilizar una columna como medio de contacto entre el agua a tratar y el carbón activado, en la que el agua entra por la parte inferior y asciende hacia la superior. El tamaño de partícula en este caso es mayor que en el otro. Se suele utilizar para eliminar elementos traza, especialmente orgánicos, que pueden estar presentes en el agua, y que habitualmente han resistido un tratamiento biológico. Son elementos, que a pesar de su pequeña concentración, en muchas ocasiones proporcionan mal olor, color o sabor al agua (Rodríguez et al., 2006).

Carbón activo en polvo (CAP). Este tipo de carbón se suele utilizar en procesos biológicos, cuando el agua contiene elementos orgánicos que pueden resultar tóxicos. También se suele añadir al agua a tratar, y pasado un tiempo de contacto, normalmente con agitación, se deja sedimentar las partículas para su separación previa. Suelen ser operaciones llevadas a cabo en discontinuo (Rodríguez et al., 2006).

Las propiedades del carbón activo se deterioran, por lo que es necesario reponer parte del mismo por carbón virgen en cada ciclo. Por otro lado el CAP es más difícil de regenerar, pero también es cierto que es más fácil de producir (Rodríguez et al., 2006).

4.1.4.4. Algodón

El algodón (*Gossypium barbadense*) es un producto agrícola no alimentario de mayor intercambio comercial en el ámbito mundial; es una planta textil de fibra suave (Bautista, 2006).

El algodón pertenece a la familia Malvaceae y el género es *Gossypium* es nativo de la mayoría de los países subtropicales. Exige un clima cálido, agua abundante durante su crecimiento, y sequía durante la maduración del fruto y la recolección (Pratt & Perez, 1997).

La especie vegetal *Gossypium barbadense* procede de Sudamérica son arbustivos y perennes; su altura varia de 1.2 a 2.40 metros, tallos erguidos y redonda ramas desplegadas. El fruto es una capsula alargada con tres vulvas y cada una tiene de seis a nueve semillas en cada celda, comúnmente larga (30 mm) (Bautista, 2006).

La fibra de algodón usualmente se clasifica en tres grandes grupos, basado en el largo de la hebra de la muestra de la paca. Entre más larga es la fibra más cotizado es su precio. La mayoría de las variedades cultivadas pertenecen a las siguientes especies; *G. barbadense*, de fibra larga, lustrosas y finas que incluyen el algodón Egipcio y el algodón Pima con un largo promedio de 3 a 7 centímetros. El segundo grupo pertenece a la variedad de especies de *G. hirsutum* de un largo mediano de 1.3 a 3.3 centímetros de la variedad de “American Upland” y del cual consiste hasta el 85 a 90% del algodón comercial producido a nivel mundial. El tercer grupo consiste de las especies *G. herbaceum* o algodón indio los cuales son burdos y de fibra corta que van de 1 a 2.5 centímetros de largo, utilizados para alfombras, sabanas, telas burdas y económicas y también mezclas con lanas (Pratt & Perez, 1997).

4.1.4.5. Guata (Geotextil)

Un geotextil es una lámina o membrana textil (guata de fibras o de filamentos, estructuras de hilos, tejidos o nó, telas no tejidas, o texturas mixtas) que, situada entre dos capas de material térreo, tiene por misión mantener la separación entre ellas (Lopez, 1986).

Los geotextiles tejidos son aquellos formados por cintas entrecruzadas en una máquina de tejer. Pueden ser tejidos de calada o tricortados; por otro lado los geotextiles no tejidos están formados por fibras o filamentos supuestos en forma laminar, consolidándose esta estructura por distintos sistemas según cual sea el sistema empleado para unir los filamentos o fibras (PAVCO S.A., 2009).

La guata se puede clasificar entre los geotextiles no tejidos, los cuales tienen diferentes campos de aplicación que pueden definirse mediante las funciones que va a desempeñar entre las que se encuentra la función de separación que consiste en la separación de dos capas de suelo de diferentes propiedades geomecánicas (granulometría, densidad, capacidad, etc.) evitando permanentemente la mezcla de material. De igual forma a su vez cuenta con la función filtro la cual impide el paso a través del geotextil de determinadas partículas del terreno (según sea el tamaño de dichas partículas y el del poro del geotextil) sin impedir el paso de fluidos o gases. En la práctica se utiliza el geotextil como filtro en muchos sistemas de drenaje. En los embalses con sistema de drenaje en la base, a fin de localizar posibles fugas, se utiliza como filtro en los tubos de drenaje a fin de evitar el taponamiento de los orificios de drenaje de dichos tubos, entre otras funciones (PAVCO S.A., 2009).

4.2.Estado del arte

En la actualidad diversos investigadores, universidades, entes gubernamentales y organizaciones que han encaminado sus esfuerzos en el estudio de sustancias, modelos, técnicas y prototipos en el tratamiento de las aguas residuales.

A nivel internacional, se reportan estudios como el desarrollado por Latrach et al., 2016 sobre la desinfección de aguas residuales domésticas a escala de laboratorio mediante el tratamiento combinado utilizando un sistema de capas múltiples de suelo y filtros de arena (MSL-SF). El sistema MSL fue construido con cajas de plásticos, contenía varias capas de mezcla de suelos mezclados con aserrín, hierro metálico y carbón vegetal, alternadas con capas de grava permeables. En cambios los filtros (SF) se diseñaron en columnas opacas de cloruro de polivinilo que en su interior poseían arena fina y grava. Entre los resultados obtenidos se reporta una ligera disminución del pH de 7.98 a 7.58, también se registró una disminución del porcentaje de SS,

DBO₅ y COD en 99.73, 97.78, 98.40, respectivamente. Así mismo, el sistema MSL demostró ser eficiente en la reducción de materia orgánica, nutrientes (P, N) y bacterias como coliformes fecales y totales.

También se encuentran investigaciones que demuestran el uso de varios materiales como medios de filtración para la adsorción de compuestos durante el tratamiento de aguas residuales, entre los que se destacan la zeolita natural y el carbón activado (Wang & Peng, 2010; Lakoleva & Sillanpaa, 2013). Las zeolitas naturales son aluminio silicatos con una estructura basada en AlO_4 y SiO_4 , las cuales presentan una capacidad de intercambio catiónico alta, así como propiedades de tamiz molecular, características que son útiles en la eliminación de sustancias contenidas en las aguas residuales (Wang & Pen, 2010). Por otra parte, el carbón activado es un producto comercial con superficie específica alta, de carácter microporoso y una alta capacidad de adsorción, por lo que elimina una amplia variedad de contaminantes orgánicos e inorgánicos y metales pesados presentes en medios acuosos (Aghakhani et al., 2013).

En ese mismo sentido, Vera et al., 2016 evaluaron el potencial de algunos materiales filtrantes como la arena, carbón activado y la zeolita en muestras de aguas residuales con fines agrícolas. Para esto construyeron columnas constituidas por uno de los tres materiales filtrantes o por proporciones (50%-50%) de mezclas entre ellos. Los resultados mostraron como el carbón activado logra remociones de boro con valores por debajo de 0.75 mg/L, valores de conductividad eléctrica y pH superiores a 2.5 dS/m y 8.4, respectivamente, lo cual probablemente podría afectar su aplicación en riego de cultivos y de plantas en general. Las muestras de aguas residuales tratadas con arena presentaron un alto contenido de arsénico y sodio, limitando así su potencial uso. Sin embargo, el agua residual tratada zeolita (100%) evidenció ser la mejor opción para ser utilizada en sistemas agrícolas, debido a la reducción de la

salinidad y la conductividad eléctrica en un 20%, sin afectar los otros parámetros de calidad de agua evaluados en este estudio.

En nuestro país Torres et al., (2003) evaluaron la influencia del tipo de medio de soporte sobre el desempeño de un filtro anaerobio para el tratamiento de las aguas residuales del proceso de extracción del almidón agrio de yuca. El prototipo de filtro estaba conformado por tres medios; cáscara de coco, anillos de guadua y lecho mixto compuesto por residuos de ladrillera y cáscara de coco. Entre los resultados más destacados se encuentran que el mejor medio para el tratamiento de las aguas residuales fue la cáscara de coco, debido a que permitió remover la mayor cantidad de demanda química de oxígeno y de sólidos suspendidos totales (70% y el 80% respectivamente).

Madera et al., 2005 analizaron un sistema combinado para el tratamiento de aguas residuales compuesto por tanque séptico (TS) - filtro anaerobio (FA) y humedales sub-superficiales (HFS). El sistema no resultó ser eficiente con relación a la calidad microbiológica del agua tratada, sin embargo, demostró su capacidad potencial en la reducción de la materia orgánica y a la vez cumplió con la legislación Colombiana (decreto 1594 de 1984) para remoción de DBO₅ y SST

Por otro lado, Carrera & Florián (2013), diseñaron una planta de tratamiento de aguas residuales domesticas tipo filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) con lenteja de agua (*Lemna minor*), separando las aguas negras de las grises en el tratamiento. Este sistema tiene una trampa de grasas para las aguas grises, como tratamiento preliminar; el efluente de las aguas grises se une con el afluente de las aguas negras en un sedimentador y llegan a un filtro anaerobio de flujo ascendente (FAFA) con lenteja de agua. El sistema implementado fue catalogado como eficiente en las remociones teóricas para sólidos suspendidos (84%), demanda biológica de oxígeno (79%), grasas y aceites (70%), nitrógeno (40%) y fósforo (30%).

Por último, Ramón et al., 2015 diseñaron y construyeron un sistema para el tratamiento de aguas residuales para su posterior uso con fines domésticos, industriales o comerciales. El sistema incluía un tratamiento con lombrifiltros (aserrín y *Eisenia foetida*), por donde las aguas residuales pasan seguidamente de una cama de carbón activado filtrando y una cama de grava de piedra, permitiendo oxigenar el agua a partir del goteo que existe entre las camas. Posteriormente, el efluente sigue a una cama de piedras de gran tamaño y a un decantador. Los resultados mostraron que el sistema es muy eficiente en la remoción de microorganismos patógenos hasta en un 90%, de igual forma, se logró obtener agua tratada con baja carga orgánica dentro de los parámetros que establece la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico CRA en Colombia.

5. Marco legal

En Colombia las aguas residuales tienen diferentes normativas que las rigen, dependiendo del origen o destino que tendrán las mismas; este proyecto se basó en la validación de un prototipo de filtro para la reutilización de aguas residuales específicamente las aguas grises, sin embargo analizando las normativas asociadas no existe hasta el momento una norma que establezca los límites permisibles con los que deben cumplir este tipo de agua.

Teniendo en cuenta lo anterior, además de la necesidad de evaluar la calidad del agua obtenida luego de la filtración con un referente normativo o bibliográfico, la presente investigación se fundamenta en los límites máximos permisibles establecidos en la resolución 1207 de 2014 por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas.

A pesar que esta resolución se centra en la reutilización de aguas del sector industrial y no en la de las aguas domésticas, se utiliza los siguientes artículos aplicables en cuanto al uso del agua para la comparación con los resultados obtenidos; teniendo en cuenta que además no existe una norma para la calidad del agua para riego:

- 1- Artículo 6°. Donde se estipula: *Los usos establecidos para agua residual tratada*. Las aguas residuales tratadas se podrán utilizar en los siguientes usos: Agrícola e industrial, entre otras disposiciones.
- 2- Artículo 7°. Establece: *Los criterios de calidad* que debe cumplir el agua residual tratada según el ítem 1 correspondiente al Uso agrícola tales como cultivos de pastos y forrajes para consumo animal, cultivos no alimenticios para humanos o animales, cultivos de fibras celulósicas y derivados, cultivos para la obtención de biocombustibles (biodiesel y

alcohol carburante) incluidos lubricantes, cultivos forestales de madera, fibras y otros no comestibles y cultivos alimenticios que no son de consumo directo para humanos o animales y que han sido sometidos a procesos físicos o químicos.

6. Diseño metodológico

6.1.Tipo de investigación

El presente estudio se llevó a cabo dentro de los términos del tipo de investigación experimental el cual consiste en someter un objeto a determinadas condiciones, estímulos o tratamientos (variable independiente), para observar los efectos o reacciones que se producen (variable dependiente) (Arias, 2012).

El propósito de este tipo de investigación es demostrar que los cambios en la variable dependiente fueron causados por la variable independiente. Es decir, se pretende establecer una relación causa-efecto (Arias, 2012).

Cuando se habla de una investigación experimental se establece la selección de dos muestras aleatorias: una, la muestra experimental sujeta a una variable especial, la otra, la muestra de control no sujeta a la influencia de la misma variable. Comparando las características finales de las dos muestras, se puede determinar el efecto del experimento (Tamayo, 2003). A partir de este enfoque se realizó el estudio del filtro objeto del presente proyecto, comparando el agua gris que entra al filtro con el agua filtrada resultante del tratamiento.

6.2.Construcción del filtro

El prototipo funcional tipo filtro se desarrolló como un piloto a escala de laboratorio con el objetivo de filtrar aguas residuales domésticas específicamente las aguas grises; obtenidas del lavado de ropa, ducha y lavamanos recolectándolas en recipientes plásticos para luego tratarlas por medio del filtro en aras de poderlas reutilizar como alternativa de riego en el sector agrícola.

El dispositivo está conformado por una estructura que se construyó a partir de una botella plástica de pet, la cual consta de una entrada y un embudo de salida cuyas dimensiones se encuentran en la tabla 1.

Tabla 1.

Dimensiones del filtro

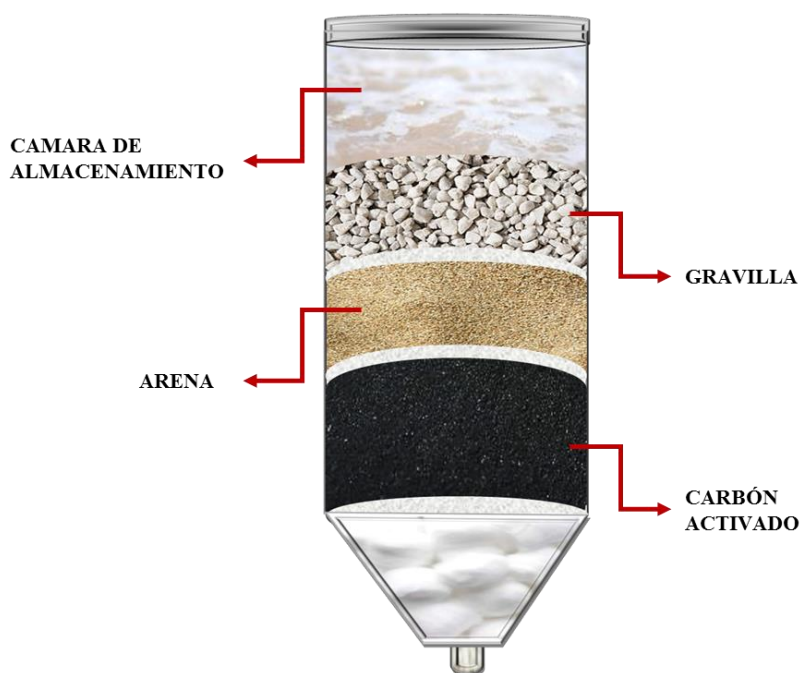
Característica	Dimensiones
Alto total del filtro	28 cm
Alto del cilindro	15 cm
Diámetro del cilindro	11, 2 cm
Alto del cono	13 cm
Diámetro orificio de salida	2,5 cm

Nota. Elaboración propia 2017.

Internamente está conformado por una cámara de almacenamiento, seguido de tres capas de material filtrante la primera capa contiene material inerte de piedra, tipo granito que se caracteriza por su rigidez térmica, además de su alta resistencia cuya función específica es retener partículas de gran tamaño; así mismo la segunda capa corresponde a material inerte de porosidad más fina, tipo arena silica resistente a los cambios bruscos de temperatura y calorimetría, que se encarga de retener partículas de menor tamaño; por último en la tercera capa se encuentra un material poroso absorbente específicamente carbón activado pulverizado que tiene como función clarificar el fluido circulante absorbiendo partículas orgánicas e inorgánicas presentes en el mismo. Entre cada una de las capas filtrantes se ubicó una lámina de guata y por último en la parte final del embudo se colocó una hoja de algodón. A su vez el prototipo construido manejo un caudal de $2.38 \text{ cm}^3/\text{min}$ y un tiempo de retención de 20 min. En la figura 1

se presenta un esquema del filtro objeto del proyecto y en la tabla 2 algunas características de los materiales filtrantes.

Figura 1



Nota. Estructura del filtro, elaboración propia 2017.

Tabla 2

Características de los materiales filtrantes

Materiales	Arena	Grava	Carbón activado
Tamaño de material filtrante	0.5 mm	15 mm	0.25 mm
Porcentaje de Porosidad	31%	60%	50%

Nota: Elaboración propia 2017.

A continuación se presenta el paso a paso para la construcción del filtro.

1. Inicialmente se tomó una botella plástica con capacidad de 2 L, y se cortó del lado de la base teniendo en cuenta que el cilindro quedara de 15 cm de alto (cuerpo del filtro), como se presenta en la figura 2.

Figura 2.



Nota: Cuerpo del filtro, elaboración propia 2017.

2. Seguidamente se cortó una botella adicional con la misma capacidad de la anterior, dejándola de una altura de 18 cm del lado del fondo, para recolectar el agua.
3. Luego se tomó la guata cortándolas en circunferencias de tal manera que encajaran con el diámetro de la botella; como se muestra en la figura 3.

Figura 3.



Nota: Láminas de guata, elaboración propia 2017.

4. Se realizó el lavado de la gravilla y arena con agua potable para garantizar que los materiales no almacenaran algún tipo de impureza que pudiese afectar el funcionamiento del filtro, después del lavado se dejó secar.
5. Posteriormente se hizo un tapón con algodón y guata para cerrar el orificio de salida de la botella (punta del embudo) como se muestra en la figura 4.
6. Una vez se tuvo listo todos los materiales y luego de haber realizado todos los cortes se procedió a la instalación de dos láminas de algodón y una de guata como se puede observar en la figura 4.

Figura 4



Nota: Pasos de construcción N° 5 y 6, elaboración propia 2017.

7. Así mismo como se evidencia en la figura 5, se agregó la primera capa que corresponde a carbón activado y se instala la segunda lamina de guata.

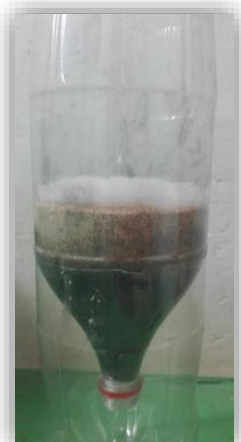
Figura 5



Nota: Capa de carbón activado, elaboración propia 2017.

8. Luego se adiciono la arena ya seca y encima de esta se ubicó otra lamina de guata tal como se presenta en la figura 6.

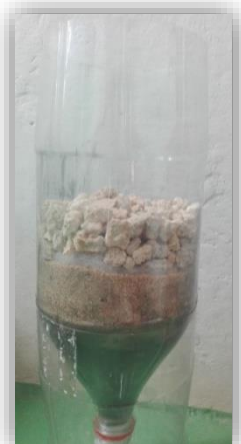
Figura 6.



Nota: Capa de arena, elaboración propia 2017.

9. Por último se agregó la gravilla tal como se presenta en la figura 7.

Figura 7.



Nota: Capa de gravilla, elaboración propia 2017.

10. Después de construido se realizaron pruebas adicionando agua potable para saturar los materiales filtrantes y de esta manera revisar que por la parte inferior del filtro no

estuviese saliendo material filtrante, en especial el que se encuentra en la primera capa del filtro.

La funcionalidad del filtro se da hidráulicamente por fuerzas gravitacionales de flujo descendente e intermitente, complementándose con un mecanismo manual en cuanto a la adición de las aguas grises y la recolección de las aguas filtradas.

Las propiedades de filtración del prototipo están en función de la retención de las partículas suspendidas mediante tres medios filtrantes de diferentes características colocados en tres capas respectivamente, que van separadas por un geotextil que aumenta el proceso de filtración; cada capa del material utilizado fue organizada en un orden jerárquico teniendo en cuenta el tamaño de las partículas a retener.

6.3. Evaluación de funcionamiento del filtro

Para evaluar la efectividad del filtro se realizó seguimiento al afluente y efluente, caracterizando diferentes parámetros propios de las aguas residuales (pH, conductividad, DQO, DBO₅, fosfato, detergentes, alcalinidad, salinidad) y analizando los niveles de remoción de cada uno de los mismos.

Para ejecutar la evaluación se realizaron tres muestreos cada uno realizado cada cuatro días y conformado por 4 muestras que contenían, agua gris, agua gris filtrada, agua gris acida filtrada y agua gris básica filtrada, estas dos últimas muestras de cada monitoreo fueron modificadas con la intención de analizar el comportamiento que tendría el agua gris en caso de modificarse el pH en el afluente.

Para caracterizar las muestras de aguas grises y filtrada se realizaron dos fases; la primera denominada recolección y tratamiento de las muestras y la segunda llamada análisis de los parámetros.

6.3.1. Fase No. 1: Recolección y tratamiento de las muestras

De forma previa al desarrollo de ésta fase se procedió a preparar cuatro botellas de plástico con capacidad de 500 ml para cada muestreo, para tener un total de doce muestras.

Seguidamente se contó con un pHmetro previamente calibrado para realizar seguimiento a las modificaciones de pH realizadas, de igual forma se construyeron 3 filtros de características iguales para garantizar prevención en cuanto a contaminación de las muestras.

Por otro lado, las botellas fueron rotuladas teniendo en cuenta el orden en que se recolectaba cada muestra, iniciando desde M1 hasta M12 seguido de la característica fisicoquímica que le correspondía; en la tabla 3 se puede observar el registro utilizado para cada muestra recolectada.

Tabla 3.

Codificación de las muestras

MUESTR EO	DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA	CODIGO
1	Agua gris	M1
	Agua gris filtrada	M2
	Agua gris acida filtrada	M3
	Agua gris básica filtrada	M4
2	Agua gris	M5
	Agua gris filtrada	M6
	Agua gris acida filtrada	M7
	Agua gris básica filtrada	M8
3	Agua gris	M9
	Agua gris filtrada	M10
	Agua gris acida filtrada	M11
	Agua gris básica filtrada	M12

Nota: Elaboración propia 2017.

Posteriormente, en cada muestreo la recolección de las aguas grises se realizó en un balde con capacidad de 20 litros, luego se dejó reposar el líquido por un período de 10 días para la respectiva maduración de la muestra principal. Luego de cada balde se tomó un volumen de 2 L para dividirlo en 4 botellas garantizando que el afluente fuese el mismo en cada muestreo y así poder tener 4 muestras de cada muestreo y rotularlas como se menciona en la tabla anterior.

Se estableció que la primera muestra correspondía al agua gris sin tratamiento, la segunda muestra era de agua gris filtrada, a la tercera y cuarta muestra se les modificó el pH antes de ser filtradas, utilizando ácido sulfúrico (H_2SO_4) e hidróxido de sodio ($NaOH$), respectivamente.

Cabe resaltar que para realizar la filtración se construyeron tres (3) filtros de características similares, con el fin de evitar que las variaciones de pH de cada muestra (3 y 4) no influyeran unas sobre otras, por lo tanto, de los tres filtros contruidos uno filtraba agua gris con características normales, seguido del filtro para agua gris con pH ácido y por último un filtro para agua gris básica, como se presenta en la figura 8.

Figura 8



Nota: Filtros para el tratamiento de las aguas grises, elaboración propia 2017.

Con relación al pH de las muestras se realizó seguimiento y control de las variaciones, teniendo en cuenta que las muestras acidificadas se mantuvieran entre 6.4 y 6.6 unidades de pH, de igual forma, se procedió con las muestras básicas logrando tener rangos de 8.4 a 8.6 unidades de pH; estas modificaciones se realizaron con el objeto de conocer el comportamiento del filtro ante aguas con variaciones de pH.

Una vez filtradas las muestras fueron recolectadas en envases plásticos rotulados según el orden y las características de la muestra, ya empacadas se sellaron las botellas de tal manera para asegurar que los líquidos no se escaparan de los recipientes; para luego depositarlas en una nevera de icopor, la cual contenía cubos de hielo para tratar de conservar las muestras a una temperatura de 4°C durante el traslado de la ciudad de Barranquilla al laboratorio AMBIELAD LTDA de la ciudad de Montería. Las muestras fueron enviadas el mismo día en que se realizó su respectivo tratamiento, con el propósito de evitar al máximo cualquier alteración en la medición de algunos parámetros como la DBO₅ y DQO.

6.3.2. Fase No. 2: Análisis de los parámetros

En la tabla 4 se mencionan cada uno de los parámetros analizados por el laboratorio en las respectivas muestras.

Tabla 4.

Parámetros y métodos de análisis

PARÁMETROS	UNIDADES	METODO DE ANALISIS
pH	Unidades	Electrométrico
Conductividad	$\mu S/cm$	Electrométrico
Salinidad	PPT	Electrométrico
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L	Volumétrico
Fosfato	mg Ptotal/L	Ácido ascórbico

PARÁMETROS	UNIDADES	METODO DE ANALISIS
Detergentes	mg/L	SAAM
DQO	mg O/L	Reflujo cerrado y volumetría
DBO ₅	mg O/L	Winkler- modificación ácida

Nota: Elaboración propia 2017.

Para determinar la eficacia del filtro objeto de este proyecto se caracterizaron las aguas entrantes y salientes del mismo, teniendo en cuenta las diferentes características propias y adaptadas al agua a filtrar.

Los resultados obtenidos en cada uno de los parámetros fueron tabulados en una hoja de cálculo de Microsoft Excel y se les aplicó estadística descriptiva para su análisis.

A continuación se hace una breve descripción de algunos de los métodos utilizados para determinar los parámetros analizados en el presente trabajo de investigación.

6.3.2.1.Método electrométrico para determinación de pH

El principio básico de la medida electrométrica del pH se fundamenta en el registro potenciométrico de la actividad de los iones hidrógeno por el uso de un electrodo de vidrio y un electrodo de referencia, o un electrodo combinado. La fuerza electromotriz (fem) producida por el sistema electroquímico varía linealmente con el pH y puede verificarse por la obtención de una gráfica de pH vs. fem para diferentes soluciones de pH conocido. El pH de la muestra se determina por interpolación. Casi todos los aparatos usados hoy en día utilizan el electrodo de vidrio, en combinación con un electrodo de calomel, empleado como electrodo de referencia, para medir el pH. El potencial entre los electrodos es proporcional a la concentración de iones hidrógeno en solución. El sistema de electrodos se calibra siempre con soluciones de pH conocido. De acuerdo con el fabricante y el tipo de medidor de pH, cada aparato posee sus propias características e instrucciones de uso (IDEAM, 2007a).

El instrumento de medida del pH está constituido por un potenciómetro, un electrodo de vidrio, un electrodo de referencia y un mecanismo compensador de temperatura; cuando se sumergen los electrodos en la solución problema se completa el circuito. Para trabajos de rutina usar instrumentos con exactitud y reproducibilidad de 0,1 unidades de pH en un rango de 0 a 14 y equipados con un compensador de temperatura Electrodo de referencia, consiste en una semicelda que provee un potencial de electrodo constante; los más comúnmente usados son electrodos de calomel y plata: cloruro de plata (IDEAM, 2007a).

6.3.2.2.Método electrométrico para determinación de la conductividad

Para la determinación de la conductividad la medida física hecha en el laboratorio es la resistencia, en ohmios o megaohmios. La conductividad es el inverso de la resistencia específica, y se expresa en micromho por centímetro ($\mu\text{mho/cm}$), equivalentes a microsiemens por centímetro ($\mu\text{S/cm}$) o milisemens por centímetro (mS/cm) en el Sistema Internacional de Unidades (IDEAM, 2006).

El intervalo de aplicación del método es de 10 a 10.000 (o hasta 50.000) $\mu\text{mho/cm}$, las conductividades fuera de estos valores son difíciles de medir con los componentes electrónicos y las celdas convencionales (IDEAM, 2006).

6.3.2.3.Método de reflujo cerrado y volumetría para determinación de DQO

Las sustancias orgánicas e inorgánicas oxidables presentes en la muestra, se oxidan mediante reflujo cerrado en solución fuertemente ácida (H_2SO_4) con un exceso de dicromato de potasio ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) en presencia de sulfato de plata (Ag_2SO_4) que actúa como agente catalizador, y de sulfato mercurico (HgSO_4) adicionado para eliminar la interferencia de los cloruros. Después de la digestión, el $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ remanente se titula con sulfato ferroso amoniacal para determinar la

cantidad de $K_2Cr_2O_7$ consumido. La materia orgánica se calcula en términos de oxígeno equivalente (IDEAM, 2007b).

Para muestras de un origen específico, la DQO se puede relacionar empíricamente con la DBO, el carbono orgánico o la materia orgánica.

El método es aplicable a aguas superficiales y residuales, usando el dicromato de 0,025 N en un rango de 2.0 mg O_2/L a 100 mg O_2/L , usando el dicromato de 0,10 N en un rango de 10 mg O_2/L a 450 mg O_2/L y con el dicromato de 0,25 N tiene un intervalo de lectura de 10 mg O_2/L a 1000 mg O_2/L (IDEAM, 2007b).

6.3.2.4.Método de incubación y electrometría para la determinación de DBO₅

Este ensayo supone la medida de la cantidad de oxígeno consumido por organismos vivos en la utilización de la materia orgánica presente en un residuo; por tanto, es necesario garantizar que durante todo el periodo de ensayo exista suficiente oxígeno disuelto para ser utilizado por los organismos. Además, debe garantizarse que se suministran las condiciones ambientales adecuadas para el desarrollo y trabajo de los microorganismos, así que hay que proporcionar los nutrientes necesarios para el desarrollo bacterial, tales como N y P y eliminar cualquier sustancia toxica de la muestra. Es también necesario que exista una población de organismos suficiente en cantidad y en variedad de especies, llamada “Cepa” o “semilla”, durante la realización del ensayo, para la degradación de la materia orgánica (IDEAM, 2007c).

El método es empleado para el intervalo de 2 a 5000 mg/L. Es un método electrométrico, en el que se determina el oxígeno disuelto consumido, en sus procesos metabólicos, por los microorganismos, en la degradación de la materia orgánica, incubando la muestra en la oscuridad a $20 \pm 30C$, por cinco días (IDEAM, 2007c).

6.3.2.5.Método volumétrico para la determinación de alcalinidad

El fundamento del método se basa en que los iones hidroxilos presentes en una muestra como resultado de la disociación o hidrólisis de los solutos reaccionan con las adiciones de ácidos estándar. Por tanto la alcalinidad depende de pH del punto final utilizado (Obregón, 2016a).

La alcalinidad se determina por titulación con una solución estándar de un ácido mineral fuerte a los puntos sucesivos de equivalencia del bicarbonato y el ácido carbónico. La titulación se efectúa a temperatura ambiente con un pH metro y un titulador automático calibrado, o mediante indicadores coloreados. Cuando se emplean indicadores coloreados se debe preparar y titular un blanco del indicador (Obregón, 2016a).

Para las muestras de baja alcalinidad (menos de 20 mg de CaCO_3/L) se debe usar una técnica de extrapolación basada en la proporcionalidad cercana a la concentración de iones de hidrogeno para el exceso de titulante más allá del punto de equivalencia. La cantidad de ácido requerido para reducir el pH exactamente 0.30 unidades es medido cuidadosamente. Debido a que este cambio de pH corresponde exactamente al doble de la concentración de iones hidrogeno, una extrapolación simple se puede hacer hacia el punto equivalente (Obregón, 2016a).

La alcalinidad esta expresada como alcalinidad a la fenolftaleína (P), o como alcalinidad total (T). La alcalinidad a la fenolftaleína corresponde al contenido total de hidróxido y carbonato presentes en la muestra y es el término utilizado tradicionalmente para la cantidad medida a pH 8.3; y la alcalinidad total es atribuible al contenido de bicarbonato, carbonato e hidróxido, y es utilizada para la cantidad medida a pH 4.5. El indicador de fenolftaleína permite cuantificar la alcalinidad a la fenolftaleína y para determinar la alcalinidad total se emplea el indicador mixto (Obregón, 2016a).

6.3.2.6.Método del ácido ascórbico para la determinación de fosfatos

El fósforo se encuentra en las aguas naturales y residuales casi exclusivamente en forma de fosfato, estos fosfatos se clasifican en orto fosfatos, fosfatos condensables y fosfatos ligados orgánicamente. Las principales fuentes de fósforo son aguas residuales domésticas, aguas de calderas, detergentes (lavanderías), fertilizantes utilizados en la agricultura, desechos orgánicos y desechos industriales (Obregon, 2016b).

El análisis de fósforo involucra dos pasos generales:

- Conversión de las formas de fósforo a ortofosfato
- Determinación colorimétrica del ortofosfato

Las formas de fósforo en una muestra pueden determinarse como:

- Total: Sin filtración.
- Disuelto: En el filtrado de una muestra pasada a través de un filtro de 0,45 μm de diámetro de poro.

El método está basado en reacciones específicas para el ion ortofosfato. El molibdato de amonio y el tartrato de antimonio y potasio reaccionan en medio ácido con el ortofosfato para formar un heteropoliácido de color amarillo –ácido fosfomolibdico-, y que es reducido por ácido ascórbico a un complejo azul de molibdeno intensamente coloreado (Obregon, 2016b).

6.3.2.7.Método electrométrico para la determinación de salinidad

La salinidad es una importante propiedad de las aguas naturales e industriales. Es un factor importante en estudios ambientales ya que puede indicar si hay presencia o no de organismos y peces (Obregon, 2016c).

Para determinar la salinidad se utilizan métodos que incluyan propiedades físicas como conductividad, densidad, velocidad del sonido o índice de refracción. De una relación empírica de salinidad y una propiedad física determinada para una solución estándar, es posible calcular la salinidad. La precisión de la medición de una propiedad física, determinara la precisión de la salinidad (Obregon, 2016c).

La salinidad se puede calcular a partir de la conductividad, el resultado es numéricamente menor que el residuo filtrable y se reporta usualmente como gramos por litro o partes por mil (ppt o ‰), o unidades prácticas de salinidad (psu o ‰) (Obregon, 2016c).

La salinidad se encuentra familiarizada con la conductividad debido a que, la conductividad se define como la capacidad que tiene una sustancia de transportar electrones (conducir electricidad); en el agua, esta capacidad se influenciada por la cantidad de sales disueltas y la temperatura. Esto significa que a mayor contenido de sales, mayor conductividad; de esta forma, se puede emplear esta propiedad para medir el contenido de sales en una muestra de agua (Obregon, 2016c).

Los salinómetros de inducción genera un campo eléctrico que induce una corriente eléctrica a través de una bobina por la que circula el fluido; esta corriente generada es proporcional a la salinidad de la muestra, de esta manera se emplea dicha propiedad para medir la concentración de sales disueltas en un líquido (Obregon, 2016c).

7. Resultados y análisis

Al momento de utilizar el filtro con las respectivas aguas grises se pudo observar que el flujo transcurría lentamente entre las capas filtrantes del dispositivo por medio de proceso físico de infiltración por gravedad, así el agua que se encontraba en la parte de arriba (Entrada del filtro) por fuerza de empuje y carga hidráulica, trasladaba el volumen de agua al extremo inferior (orificio de salida), con un caudal de 2.38 ml/min.

También se pudo evidenciar que el volumen de agua gris disminuyó a medida que paso por cada uno de los materiales filtrantes (grava, arena, carbón activado, guata y algodón) debido a que durante el proceso de filtrado intervienen factores relevantes en el comportamiento hidráulico del flujo como lo son la porosidad de cada uno de los materiales filtrantes, la relación de vacío y su capacidad de retención que hacen que la velocidad del mismo también disminuya notablemente.

El primer volumen de agua vertido en el dispositivo tipo filtro, se considera de saturación, debido a que a partir de este punto comienza a salir por goteo el volumen de agua filtrada; para lograr dicha saturación se adicionó 100 ml de agua potable, así además se pudo notar que por cada 500ml adicionados se recolectaban alrededor de 450 a 470 ml presentando de 30 a 50 ml de diferencia con el volumen inicial.

El agua resultante o agua filtrada obtenida una vez que el agua gris es tratada por medio del filtro construido, presenta características organolépticas eficaces según lo analizado cualitativamente; debido a que el color que es uno de los parámetros de mayor notoriedad pasa de ser agua gris a un agua transparente como se muestra en la figura 9; de igual forma en cuanto

al olor luego de la filtración es inodora y no se evidenció presencia de material flotante luego de la filtración.

Figura 9.



Nota: Muestras de agua analizadas, elaboración propia 2017.

Durante la logística para el envío de las muestras cada una fue numerada en orden ascendente como se presenta en el ítem de diseño metodológico en la tabla 3, con el fin de identificar el orden de recolección y el muestreo al que corresponde. Para presentar los resultados obtenidos se agruparon los valores según la naturaleza de muestra y el número del muestreo.

En tabla 5 presentada se encuentra el promedio de los resultados obtenidos según los parámetros analizados, la naturaleza de las muestras y los muestreos, con el respectivo rango de remoción que hubo en algunos de los parámetros.

Tabla 5.

Promedio de resultados obtenidos y rango de las remociones

Parámetros	Unidades	Agua gris	Agua gris filtrada	Agua gris ácida filtrada	Agua gris básica filtrada	% Disminuciones o Remoción
pH	Unidades de pH	7.14	5.46	5.26	5.16	22.6 - 28.4
Conductividad	µS/cm	4643	3350	4730	4820	27.2 - 28.8
Salinidad	ppt	2.17	2.3	2.27	1.63	10 - 36
Alcalinidad	mg CaCO ₃ /L	1861	1020	1961	2028	44.8 - 45.5
Fosfatos	mg P _{total} /L	2.5	1.06	1.25	1.33	46.5 - 58.3
Detergentes	mg/L	4.76	2.82	1.58	3.23	29.2 - 68.8
DQO	mgO ₂ /L	2428	292	390	330	83.9 - 88.1
DBO₅	mgO ₂ /L	1064	160.33	206	175.92	80.2 - 85.1

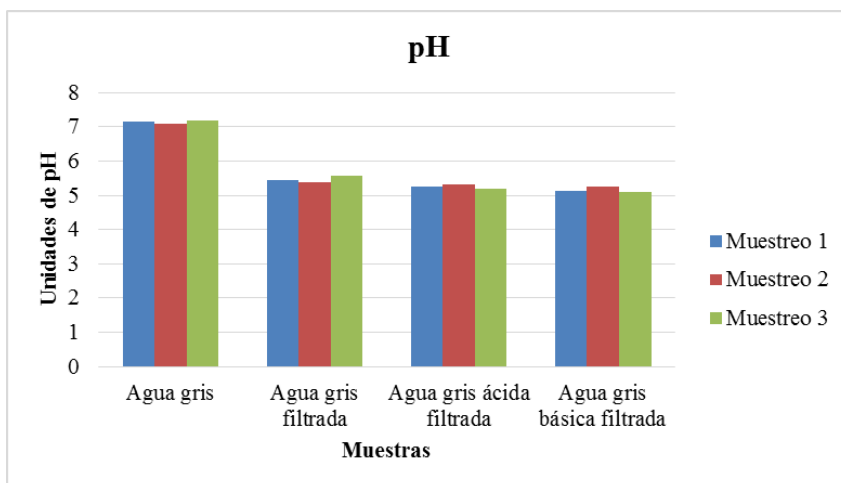
Nota: Elaboración propia 2017.

En los siguientes ítems se analizan los resultados obtenidos individualmente teniendo en cuenta el comportamiento de los parámetros evaluados.

7.1.Comportamiento de pH

En la figura 10 se encuentran el comportamiento de pH en las muestras filtradas con relación a las muestras de agua gris de cada uno de los tres muestreos realizados.

Figura 10.



Nota: Comportamiento de pH, elaboración propia 2017.

Observando los resultados para cada una de las muestras analizadas se pudo establecer que las muestras de agua gris se mantuvieron en un rango de pH de 7.10 a 7.18 unidades; por otro lado las muestras de agua gris filtrada registraron un pH entre 5.38 y 5.56, de igual forma el agua gris ácida filtrada estuvo entre 5.20 a 5.31 y el agua gris básica filtrada presentó valores entre 5.10 a 5.25 unidades.

Se evidencia que todas las muestras al momento de ser filtradas disminuyeron su pH, sin embargo, comparando los resultados obtenidos con la resolución 1207 de 2014 art 7 donde el valor límite máximo permisible se establece entre 6.0 – 9.0 unidades de pH, se puede decir que las muestras analizadas no cumplen con normativa asociada.

De acuerdo a la comparación entre el promedio obtenido de los resultados de agua gris con los promedios de las muestras filtradas se evidenciaron niveles bajos de pH y levemente ácidos, esta situación posiblemente se debe a la maduración de las muestras lo cual causa la variación del pH.

Otro de los factores que posiblemente está incidiendo en las disminuciones son los materiales utilizados en la construcción del filtro, tal es el caso del carbón activado y la guata (geo textil); el primero se cree que probablemente influya por la relación que existe entre el pH y el carbón en cuanto a la capacidad de adsorción por la sobresaturación del mismo, y la guata puede estar influyendo por las impurezas de este material que de cierta forma pueden estar traspasando al momento de reutilizar el filtro.

El pH del agua de riego no es un criterio usado para evaluar su calidad, debido a la disparidad existente en la capacidad tampón entre el agua y suelo. No obstante, ésta es una variable muy importante, ya que determina las concentraciones relativas de las especies disueltas (Baccaro et al., 2006); además de este parámetro depende en gran parte la disociación de ciertos nutrientes y otros compuestos.

Por otra parte, el sistema de tratamiento combinado de capas de suelo y filtros de arena para la desinfección de aguas domésticas diseñado por Latrach et al., 2016, mostró una ligera disminución del pH de 7.98 a 7.58 unidades. Este cambio en el valor del pH del agua tratada lo relaciona con los procesos de nitrificación y desnitrificación en el piloto del sistema; Comparando estos resultados con los obtenidos en el presente proyecto se evidencia que los valores de pH determinado son inferiores y presentaron una disminución significativa según el promedio calculado de 7.14 a 5.29.

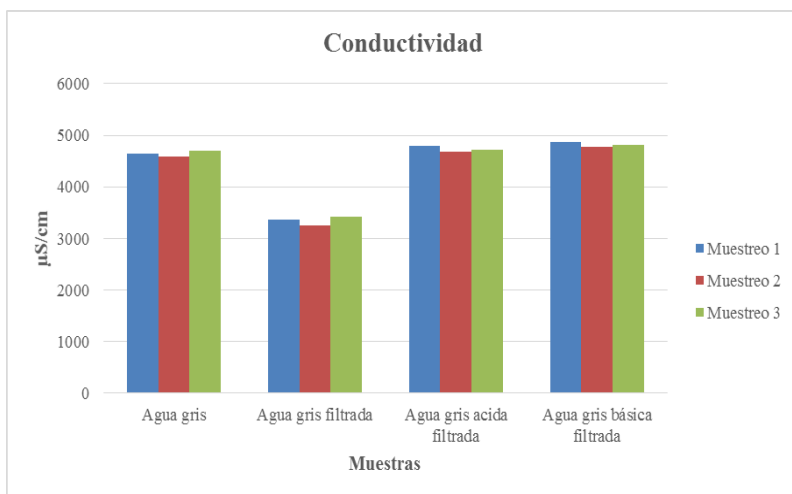
En ese sentido, Torres et al., 2003 reportó valores de pH con un promedio de 4.7 unidades en un filtro anaerobio para el tratamiento de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca, dicho valor es inferior al reportado en este estudio.

Por otro lado, a pesar de que los resultados obtenidos de pH no cumplen con la normativa asociada a este proyecto, Proaño (2002) afirma que la totalidad de los nutrientes se mantienen en forma directamente asimilable para las plantas, en el rango de pH 5.0 a 6.5 ya que por encima de 6.5 puede haber formación de precipitados y por debajo de 5.0 puede verse afectado el sistema en especial si el cultivo es hidropónico; debido a que un adecuado pH asegura una mejor asimilación de los diferentes nutrientes especialmente el fósforo y micronutriente.

7.2.Comportamiento de la conductividad

A continuación se presentan en la figura 11 el comportamiento de la conductividad en las muestras filtradas con relación a las muestras de agua gris de cada uno de los muestreos realizados.

Figura 11.



Nota: Comportamiento de la conductividad, elaboración propia 2017.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos para cada una de las muestras analizadas se pudo establecer que las muestras de agua gris se mantuvieron en un rango de conductividad de 4580 a 4700 µS/cm; las muestras de agua gris filtrada registraron valores entre 3260 y 3420, los de agua

gris ácida filtrada oscilaron entre 4680 y 4790 y el agua gris básica filtrada presentó valores entre 4780 a 4860.

En ese sentido, las muestras analizadas de agua gris filtrada presentaron los menores valores de conductividad, mientras que los mayores se conductividad se encontraron en las muestras de agua gris básica filtrada. También se pudo evidenciar que los valores de conductividad tanto de las muestras de agua ácida y básica filtrada, son similares a la muestra de agua gris inicial, independientemente de la pequeña variación de pH que se les realizó previamente a las muestras.

Comparando los resultados obtenidos con la resolución 1207 de 2014 art 7 donde el valor límite máximo permisible para la conductividad se establece en $1500 \mu\text{S}/\text{cm}$, se puede decir que las muestras analizadas no se encuentran dentro del límite exigido, siendo esto una característica importante debido a que la conductividad se encuentra asociada a la cantidad de sales presentes en las aguas y estas influyen directamente en la vitalidad de las plantas además de otros factores.

La importancia de la conductividad eléctrica en la calidad de agua para riego consiste en su influencia en la presión osmótica del agua en el suelo por lo que conduce a un mayor gasto de energía por parte de la planta para extraer el agua. Esto trae como resultado, que la respiración de las plantas aumente, afectando el crecimiento y rendimiento de la mayoría de cultivos (Vera et al., 2016); sin embargo teniendo en cuenta lo establecido por este autor la influencia se da a partir de $3 \text{ dS}/\text{m}$ y los valores obtenidos en el presente proyecto son inferiores.

Comparando los resultados de conductividad con otras investigaciones, se reportan en un sistema de filtración y desinfección de aguas domésticas conformado por capas de suelo y filtros de arena, la disminución de los parámetros de conductividad de $0.72 \text{ mS}/\text{cm}$ ($720 \mu\text{S}/\text{cm}$) a un

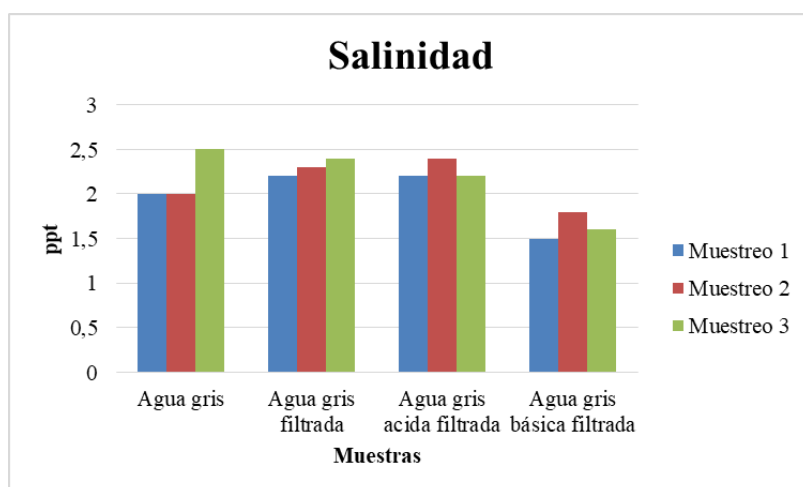
rango de 0.52 a 0.46 mS/cm (520 a 460 μ S/cm) (Latrach et al., 2016), valores que resultan inferiores al relacionarlos con los registrados en las muestras analizadas.

Por otro lado, Vera et al., 2016 reportó la reducción hasta en un 20% los valores de conductividad utilizando como medio de filtración zeolita, en la evaluación de materiales filtrantes para el reúso en la agricultura de aguas residuales tratadas provenientes de zonas áridas, donde se estudiaron otros seis filtros de características diferentes; por el contrario el filtro objeto del presente trabajo logró disminuir en el agua gris filtrada hasta el 29% de conductividad eléctrica mostrando mayor eficiencia.

7.3.Comportamiento de salinidad

En la figura 12 se evidencia el comportamiento de la salinidad en las muestras filtradas con relación a las muestras de agua gris de cada uno de los muestreos realizados.

Figura 12.



Nota: Comportamiento de la salinidad, elaboración propia 2017.

La salinidad es uno de los parámetros que menor variación tuvo en cuanto al agua gris, sin embargo el agua gris básica filtrada fue la que mayor disminución tuvo, los resultados obtenidos que los valores de agua gris se mantuvieron en un rango de salinidad de 2.0 a 2.5 ppt; las muestras de agua gris filtrada y el agua gris ácida filtrada presentaron el mismo rango de salinidad entre 2.2 a 2.4, y el agua gris básica indicó valores de salinidad entre 1.5 a 1.8.

Según los muestreos 1 y 2, los resultados del agua gris filtrada y el agua gris ácida filtrada aumentaron entre 0.2 y 0.4 ppt con relación al agua gris, a diferencia del muestreo 3 donde ambas muestras disminuyeron entre 0.1 y 0.3 ppt. Por otro lado, se puede destacar que en las muestras de agua gris básica filtrada se logró disminuir la concentración de salinidad entre 0.2 y 0.5 ppt en los tres muestreos realizados.

La salinidad es uno de los parámetros que menor variación maneja en cuanto al agua gris, sin embargo, el agua gris básica filtrada fue la que mayor disminución tuvo; a diferencia de las otras muestras filtradas las cuales aumentaron en comparación con el agua gris, este parámetro resulta de vital importancia en el agua para riego ya que de los niveles presentes depende la disponibilidad de agua para las plantas.

La salinidad ha sido definida como uno de los parámetros más importantes que afecta la producción de los cultivos, por tanto, debe ser controlada y monitoreada cuando se emplea agua residual con fines de riego. Éste parámetro permite inferir la cantidad de minerales disueltos en el agua (Vera et al., 2016) y también se puede determinar a partir de la conductividad (dS/m) (Pérez, 2011).

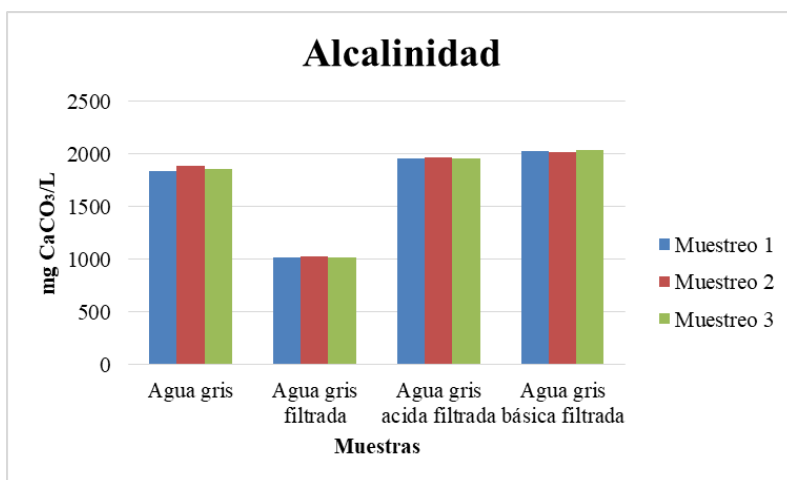
Desde ese criterio, Bacaro et al., 2006, evaluó la calidad de agua para consumo humano y riego, registrando valores de conductividad entre 1.11 dS/m y 1.39 dS/m, asimismo afirmó que

valores de conductividad inferiores a 3 dS/m permite que exista concentraciones de sales normales las cuales no afectan el rendimiento de algunos cultivos. De igual forma, Vera et al., 2016, reportó una reducción de la salinidad en muestras de agua residuales con valores de conductividad de 2,5 dS/m tratadas a través de un filtro de zeolita.

7.4.Comportamiento de la alcalinidad

La figura 13 se presenta los resultados de la alcalinidad obtenidos en las distintas muestras.

Figura 13.



Nota: Comportamiento de la alcalinidad, elaboración propia 2017.

Los mayores valores de alcalinidad los presentaron las muestras de agua gris básica filtrada con registros entre 2020 a 2015 mg de CaCO₃/L, seguido por las muestras de agua gris ácida filtrada con valores de 1956 a 1970, luego están los valores de las aguas grises que oscilan entre 1840 a 1882 y los menores fueron encontrados en las de agua gris filtrada con un rango entre 1015 a 1026 mg CaCO₃/L

Los resultados también muestran que los valores de agua gris filtrada disminuyeron alrededor de 800 mg CaCO₃/L con relación a las muestras de agua gris, a diferencia de las muestras de

agua gris ácida filtrada y de agua gris básica filtradas las cuales aumentaron después de pasarla por el filtro; este aumento se puede deber a las modificaciones realizadas en el pH de las muestras mencionadas.

La alcalinidad se fundamenta en la presencia de carbonatos de hidróxido, bicarbonato, calcio, magnesio y sodio (García, 2012); los carbonatos hacen parte de la materia prima para el proceso de fabricación de los jabones (Cárdenas, 2008), por lo que se puede decir que los altos valores de alcalinidad que presenta el agua de estudio (aguas grises) se deben a estos. La alcalinidad ayuda a regular los cambios de pH producidos; lo que hace inferir que debido a la variación inicial de pH, las muestras de agua gris ácida filtrada y básica filtrada sufren un aumento en sus valores de alcalinidad, en especial el aumento en la muestra de agua gris básica filtrada que probablemente es debido a la adición de hidróxido de sodio para aumentar su pH.

Por otro lado, los resultados obtenidos en este proyecto son mayores a los reportados por Rodríguez et al., 2013 (10-26 mg/L) en muestras de agua residuales tratadas por medio de humedades de flujo vertical.

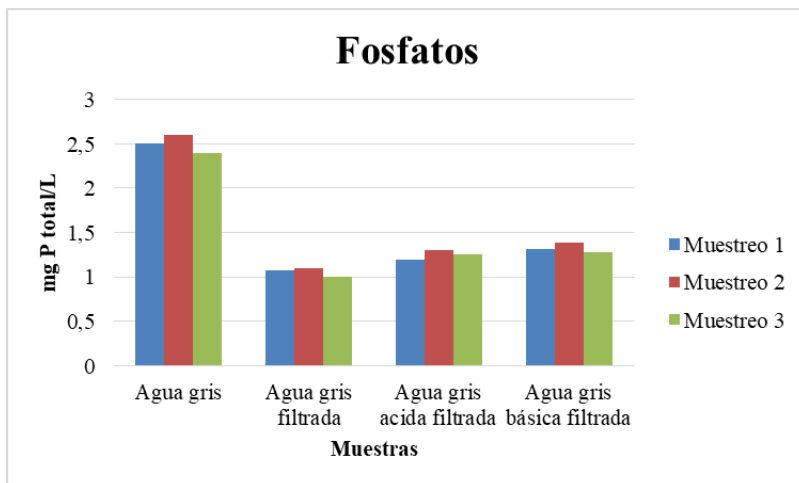
En cambio Cajigas et al., 2005 reportaron un incremento entre 277 y 1604 mg/L CaCO_3 en muestras de aguas residuales de un proceso de extracción de almidón de yuca tratadas por medio de un método anaerobio, que en comparación con el presente proyecto evidencia mayor eficiencia debido a que disminuye los valores de este parámetro en la muestra de agua gris filtrada.

7.5.Comportamiento de los fosfatos

Los niveles de fosfatos encontrados en las muestras de agua gris mantuvieron un rango de de 2.4 a 2.6 mg P_{total} /L; las muestras de agua gris filtrada presentan fosfatos entre 1.0 y 1.1, las de

agua gris ácida filtrada obtuvo valores entre 1.2 y 1.3, y el agua gris básica filtrada registró valores entre 1.28 y 1.39 mg Ptotal/L (Figura 14).

Figura 14.



Nota: Comportamiento del fosfato, elaboración propia 2017.

Comparando el comportamiento de cada una de las muestras filtradas con el agua gris se puede decir que a pesar de las variaciones de pH realizados, con relación al fosfato las muestras todas tuvieron la tendencia a disminuir sus niveles, sin embargo cabe anotar que la principal disminución se observó en las muestras de agua gris filtrada, en la cual se removió alrededor de 1.4 mg Ptotal/L; a diferencia del agua gris ácida filtrada y el agua gris básica filtrada donde se redujo la concentración de fosfatos alrededor de 1.2 mg Ptotal/L.

En términos de porcentajes se puede afirmar que las muestras donde hubo mayor remoción de fosfato fue en el agua gris filtrada reduciendo hasta un 57% su concentración, seguida de las muestras de agua gris ácida filtrada con una remoción aproximadamente de un 50%, de igual forma el agua gris básica filtrada tuvo una reducción alrededor del 47% de concentración de fosfato; Las disminuciones logradas en los fosfatos en esta investigación se pueden atribuir a que

los suelos tienen la capacidad de adsorción de fosforo ya que son constituyentes naturales de rocas y minerales que debido a que el filtro construido está conformado por grava, arena y carbón activado confiere la capacidad al sistema para retener los fosfatos (Lavie et al., 2010).

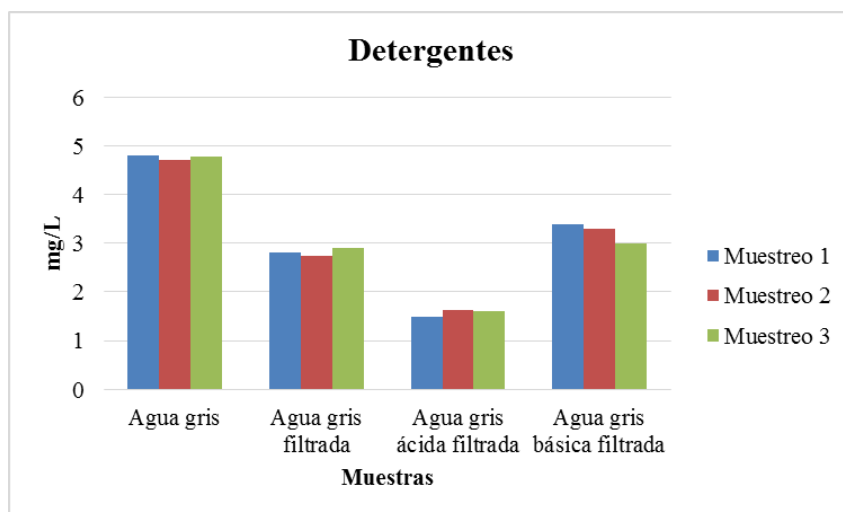
Los fosfatos son sustancias solubles que requieren las plantas para su desarrollo, que cuando se encuentran en el agua en cantidades excesivas inducen el crecimiento desmesurado de algas y otros organismos provocando procesos de polución y eutroficación (Lavie et al., 2010); Por lo que resulta favorable la disminución de las concentraciones de los niveles de fosfatos presentes en las aguas estudiadas ya que reduce la posibilidad de crecimiento de algas en el agua que se prepara para riego y el aumento desproporcionado de este nutriente en los lugares de riego.

Comparando los resultados obtenidos de fosfatos con los determinados en otras investigaciones, se pudo evidenciar que mediante un sistema de tratamiento combinado de capas de suelo y filtros de arena para la desinfección de aguas domesticas se logró una disminución de 91% y 78% en los niveles de fosfatos (Latrach et al., 2016), por el contrario, las muestras caracterizadas en el presente estudio mostraron remociones menores a la que afirma la investigación mencionada.

7.6.Comportamiento de los detergentes

En la figura 15 se registran los contenidos de detergentes en cada una de las muestras analizadas.

Figura 15.



Nota: Comportamiento de los detergentes, elaboración propia 2017.

Se puede observar que las muestras de agua gris presentaron concentraciones de detergentes en un rango de 4.7 a 4.8 mg/L; las muestras de agua gris filtrada tenían concentraciones entre 2.75 a 2.9 mg/L, las de agua gris ácida muestran valores entre 1.5 y 1.64 mg/L y las de agua gris básica filtrada registró valores entre 3.0 a 3.4 mg/L.

Observando el comportamiento de los detergentes, es notable que la muestra que las muestras con mayor remoción son las de agua gris ácida filtrada (67%), seguida de las muestras de agua gris filtrada (41%) dejando por último las muestras de agua gris básica filtrada (32%).

Los detergentes son sustancias comúnmente presentes en la aguas residuales domésticas e industriales; por lo tanto característicos en las aguas grises (agua de estudio), los detergentes son productos que se usan para la limpieza y están formados básicamente por un agente tensoactivo que actúa modificando la tensión superficial disminuyendo la fuerza de adhesión de las partículas (mugre) a una superficie (Pozo, 2012), esto ocurre con frecuencia en las aguas grises

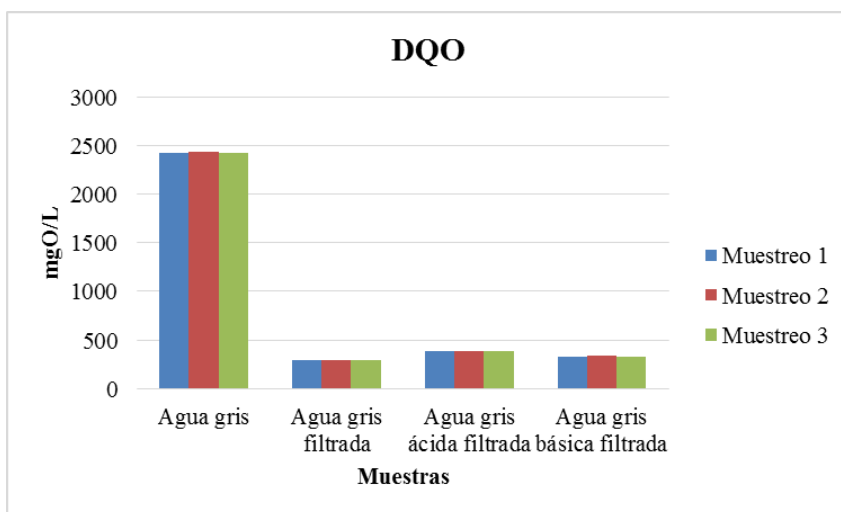
las cuales en consecuencia quedan con partículas suspendidas, lo que resulta favorable para este proyecto debido a que la composición del filtro permite retener cierta cantidad de partículas y detergentes disueltos logrando la remoción indicada anteriormente.

La mayoría de los detergentes tienen como principio activo los fosfatos lo cual contribuye a la eutrofización, por ende también en la afectación de los procesos bacterianos y a la capacidad depuradora de los ríos, actuando como contaminante del agua. El poder contaminante de los detergentes se manifiesta en los vegetales acuáticos inhibiendo el proceso de la fotosíntesis originando la muerte de la flora (Pozo, 2012); por lo tanto se puede decir que la acción realizada por el filtro es buena ya que logra remociones hasta del 62% de detergentes dependiendo del pH con el que ingresen las aguas.

7.7.Comportamiento de la DQO

Teniendo en cuenta los resultados de DQO obtenidos en cada una de las muestras analizadas se pudo establecer que el agua gris mantuvo un rango de 2420 a 2438 mg O₂/L; las muestras de agua gris filtrada presentaron un promedio de 291 mg O₂/L, el promedio de las de agua gris ácida filtrada fue de 389 mg O₂/L y el agua gris básica filtrada fue de 329.5 mg O₂/L (Figura 16).

Figura 16.



Nota: Comportamiento de la DQO, elaboración propia 2017.

Asimismo se puede observar que las muestras donde con mayor remoción de DQO fueron las agua gris filtrada reduciendo hasta un 88% la concentración de la demanda química de oxígeno, seguida de las muestras de agua gris básica filtrada con una remoción de aproximadamente un 86%, de igual forma el agua gris ácida filtrada con una reducción del 83 %; dejando entre ver que las reducciones en este parámetro resultaron ser bastante eficaces.

La demanda química de oxígeno (DQO) es la cantidad de oxígeno consumido por las materias orgánicas existentes en el agua y oxidables (Pozo, 2012), la materia orgánica potencialmente puede consumir el suministro de oxígeno disuelto vital en el agua (Barba, 2002); el filtro construido demostró tener una gran capacidad de retención del material suspendido y por ende gran cantidad de materia orgánica es eliminada de las aguas estudiadas, disminuyendo así la demanda química de oxígeno y favoreciendo probablemente el aumento del oxígeno disuelto en

el agua; ya que la DQO está en función de las características de la materia presente, de sus proporciones respectivas y de las posibilidades de oxidación (Pozo, 2012).

Comparando los resultados de la demanda química de oxígeno obtenidos con los de otras investigaciones; se encontró que Torres et al., 2003 reportaron una remoción del 70% con relación a la DQO presentando alta disminución de la carga orgánica en un filtro anaerobio para el tratamiento de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca, evidenciando que la eficiencia del filtro construido en el presente proyecto fue mayor con valores entre 83% y 88%.

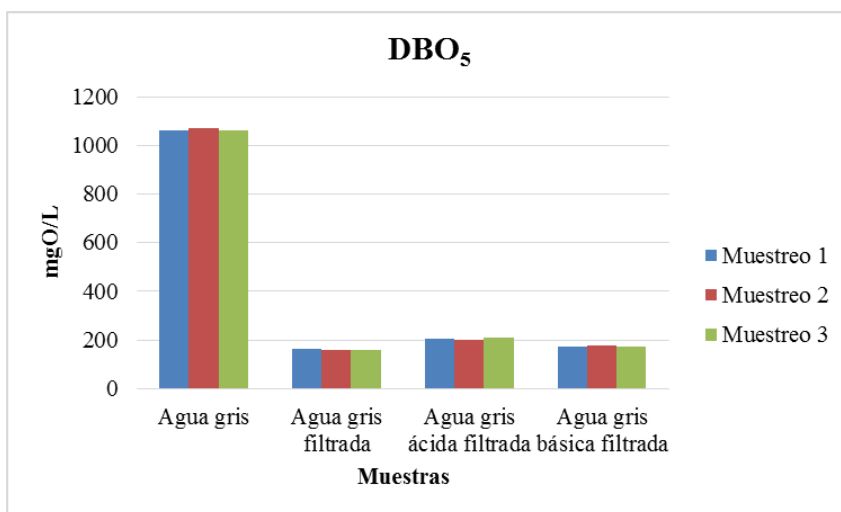
Además, en un sistema combinado para el tratamiento de aguas residuales basados en tanque séptico - filtro anaerobio y humedales subsuperficiales diseñado por Madera et al., 2005, evidenció disminuciones de carga orgánica de aproximadamente 9%, mostrando gran diferencia a las remociones logradas con el filtro objeto de estudio ya que muestra mayor eficiencia.

Por otro lado, el sistema de tratamiento combinado de capas de suelo y filtros de arena para la desinfección de aguas domésticas diseñado por Latrach et al., 2016, mostró una remoción del 92% en cuanto a DQO; la cual al compararla con los resultados obtenidos en el presente proyecto evidencia que los porcentajes de remoción de DQO determinados son inferiores al mencionado pero de igual forma con una buena eficiencia con relación al tratamiento.

7.8.Comportamiento de la DBO₅

A continuación la figura 17 muestra los resultados obtenidos de DBO₅ a partir del análisis de los tres muestreos realizados.

Figura 17.



Nota: Comportamiento de la DBO₅, elaboración propia 2017.

Revisando los resultados obtenidos de la DBO₅ en cada una de las muestras analizadas se observa que el agua gris registra una concentración de 1065 mg O/L; las muestras de agua gris filtrada muestran una concentración de 160 mg O/L, las de agua gris ácida filtrada fue de 206 mg O/L y la de agua gris básica fue de 176 mg O/L.

La mayor remoción de DBO₅ se presentó en el agua gris filtrada con una reducción del 85%, sigue la del gris básica filtrada con una remoción del 83. 5% y por último se encuentra la remoción del agua gris ácida con 80 %; demostrando que el uso del filtro incide positivamente en la reutilización de las aguas grises.

La demanda biológica de oxígeno se define como la cantidad de oxígeno disuelto requerido por los microorganismos para la oxidación aerobia de la materia orgánica biodegradable presente en el agua; es el parámetro más usado para medir la calidad de aguas residuales y superficiales, para determinar la cantidad de oxígeno requerido para estabilizar biológicamente la materia

orgánica del agua (Pozo, 2012). Por lo anterior resulta favorable la disminución que se obtuvo con la aplicación del filtro construido, ya que al eliminar altas cantidades de materia orgánica se reduce el requerimiento de las cantidades de oxígeno.

Comparando los resultados de la demanda biológica de oxígeno obtenidos con los de otras investigaciones; se encontró que Pedraza et al., 2002 lograron remociones de DBO_5 mayores de 90% en una evaluación de biodigestores de geomembrana y plástico para el tratamiento de aguas residuales de origen porcino, presentando este mayor eficacia que el que ofrece el filtro objeto de estudio.

Latrach et al., 2016, en su estudio de desinfección de aguas residuales domésticas a escala de laboratorio mediante el tratamiento combinado utilizando un sistema de capas múltiples de suelo y filtros de arena (MSL-SF) logro remover en un 73% los niveles de DBO_5 ; al comparar estos resultados con los obtenidos en el presente proyecto se evidencia que el tratamiento por medio del filtro construido fue más eficaz ya que se manejaron mayores valores de remoción.

Por otra parte, en una investigación de fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales se removió la demanda biológica de oxígeno hasta en un 80% (Arias et al., 2010), porcentaje que al compararse con los resultados del filtro se puede decir que se encuentra alrededor de los mismos porcentajes de disminución logrados en el presente proyecto (80% – 85%).

8. Conclusiones

- Se logró evaluar el prototipo tipo filtro diseñado e implementado para la reutilización de aguas grises, verificando la alta capacidad de remoción en algunos de los parámetros determinados, dando características confiables al agua a reutilizar para riego; además se logró evidenciar que una vez filtrada el agua gris por medio del filtro construido el agua resultante también se podría utilizar en otras actividades como el lavado de autos, sanitarios, lavado de pisos, entre otras superficies.
- Según los resultados obtenidos de pH y conductividad analizados con la normativa vigente resolución 1207 del 2014 las muestras filtradas con relación los parámetros de pH y conductividad no cumplen con lo establecido o límite permitido.
- El valor de pH a pesar de no encontrarse en la concentración establecida en la normativa según la literatura los resultados no presenta riesgo para las plantas, ya que este parámetro depende o se ve influenciado por otros factores como el pH aportado por el suelo, y todas las plantas cuentan con diferentes rangos de pH que pueden tolerar y los valores determinados en este estudio podrían clasificar para cierto tipo de planta.
- La conductividad a pesar de exceder el límite establecido por la normativa utilizada, en cuanto a la literatura consultada nos permite suponer que los resultados encontrados pueden ser tolerados por las plantas sin afectar su crecimiento y desarrollo.
- Los valores de alcalinidad se manejaron bastante altos, aun después de la filtración no logró disminuirse a satisfacción se podría decir que esto es debido a la presencia de carbonatos y esta variable podría convertirse en una problemática al utilizarla como agua de riego si no se contrala debidamente.

- La mayor efectividad y eficacia lograda con el desarrollo y validación del filtro objeto de este proyecto se da en la disminución de DBO_5 y DQO removiendo altos porcentajes de los mismos entre 80 y 88 % con relación al agua gris respectivamente.
- De las muestras analizadas teniendo en cuenta sus variaciones de pH inicial, se evidencia que el agua gris filtrada fue la que manejo un mejor comportamiento disminuyendo la concentración de los parámetros analizados (pH, conductividad, salinidad, alcalinidad, fosfatos, detergente, DBO_5 y DQO), aunque las muestras de variación acida y básica no tuvieron un comportamiento muy distante al de la muestra sin variaciones, sin embargo si presentaron en algunos parámetros aumentos o disminuciones con relación al agua gris y al agua gris filtrada.
- También se puede decir que las características organolépticas de las aguas filtradas extienden la durabilidad de las mismas luego de la filtración, lo que da el beneficio de ampliar el tiempo del almacenamiento de estas aguas en los casos que se requieran dependiendo del uso que se le dará.

9. Recomendaciones

Tras conocer los resultados obtenidos en el proyecto y teniendo en cuenta algunas recomendaciones que se puedan incorporar a futuro en este para lograr una mejor calidad del agua, se estima que:

- Debido a que la salinidad es un parámetro determinante en cuanto a la calidad del agua para riego se debe realizar un mejor seguimiento acompañado del análisis del RAS (relación de absorción de sodio) que va asociada a la determinación de calcio, magnesio y sodio para así hacer un control más eficaz, además evaluar parámetros (sólidos suspendidos, sólidos disueltos, metales entre otros) que puedan estar asociados a la salinidad para lograr determinar a que se deben sus variaciones.
- Implementar otros estudios que permitan conocer de forma exhaustiva los motivos por los cuales se presenta los altos niveles de alcalinidad y de qué manera se pueden controlar manteniéndolos en un rango confiable para el crecimiento de las plantas sin causar afectación al agua o al suelo del medio donde se encuentre el cultivo.
- Resulta de vital importancia la medición y seguimiento de otras variables incluyendo algunos metales para descartar cualquier tipo de contaminación o bioacumulación en las plantas y más aún si las plantas son para consumo.
- Teniendo en cuenta lo anterior es indispensable un estudio de fitoquímico a las plantas de consumo que se utilicen como objeto de investigación.
- De igual forma teniendo en cuenta en Colombia no existe una normativa enfocada en la reutilización de aguas grises que pueda respaldar la aplicación de este tipo de tecnologías, se recomienda ampliar el marco normativo en esta área.

10. Referencias

- Aghakhani, A., Mousavi, S., & Mostafazadeh, B. (2013). Desalination of saline water with single and combined adsorbents. *Desalination and Water Treatment*, 51(7-9), 1928-1935.
- Akdeniz, E., & Bagriyanik, M. (2016). A knowledge based decision support algorithm for power transmission system vulnerability impact reduction. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 78, 436-444.
- Apaza, H. (2013). *Tratamiento ecologico, una alternativa sustentable para la purificacion de aguas contaminadas destinadas al riego de cultivos en Arequipa*. Obtenido de [http://seminarioanual.cies.org.pe/mesa-tematica/tratamiento-ecol%
c3%b3gico-una-alternativa-sustentable-para-la-purificaci%
c3%b3n-de-aguas](http://seminarioanual.cies.org.pe/mesa-tematica/tratamiento-ecol%c3%b3gico-una-alternativa-sustentable-para-la-purificaci%c3%b3n-de-aguas)
- Arias Martinez, S., Betancur Toro, F., Gomez Rojas , G., Salazar Giraldo, J., & Hernandez Angel, M. (2010). Fitorremediación con humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales porcinas. *Informador Técnico*, 74, 12-22.
- Arias, F. (2012). *El proyecto de investigacion* (6 ed.). Caracas: Episteme.
- Aznar, A. (2000). Determinación de los parámetros fisico-quimicos de calidad de las aguas. *Gestion Ambiental*, 2(23), 12-19.
- Baccaro, K., Degorgue, M., Lucca, M., Picone, L., Zamuner, E., & Andreoli, Y. (2006). Calidad del agua para consumo humano y riego en muestras del cinturón hortícola de Mar del Plata. *RIA. Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 35(3), 95-110.

- Barba, L. (2002). Conceptos basicos de la contaminacion del agua y parametros de medición. *Curso Internacional Gestión Integral del Tratamiento de Aguas Residuales* (págs. 1-51). Cali: UNC.
- Bautista, E. (2006). *Estudio de rentabilidad del cultivo del algodonero (Gossypium hirsutum L.) utilizando la variedad transgenica 448B, en el ejidio luchana, municipio de San Pedro, Coahuila*. Tesis, Universidad Autonoma Agraria Antonio Narro.
- Cajigas Ceron, A., Perez Vidal, A., & Torres Lozada, P. (2005). Importancia del pH y la alcalinidad en el tratamiento anaerobio de las aguas residuales del proceso de extraccion de almidon de yuca. *Scientia Et Technica*, XI(27), 243-248.
- Cárdenas, D. (2008). *Optimización de la planta de tratamiento de aguas residuales industriales para el reuso en el proceso productivo de una industria de jabones*. Proyecto de grado, Universidad de la Salle, Bogota.
- Carrera, S., & Florián, A. (2013). *Diseño de una planta de tratamiento de aguas residuales domésticas tipo filtro anaerobio de flujo ascendente (fafa) con lenteja de agua*. Tesis, Neiva.
- Castellar, G., Angulo, E., Zambrano, A., & Charris, D. (2013). Equilibrio de adsorción del colorante azul de metileno sobre carbón activado. *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica*, 16(1), 263-271.
- Castro, L., & Orozco, L. (2015). *Manejo de aguas residuales mediante un sistema de fosa septica en el area rural, la finca el recuerdo, vereda centro del municipio Acacias-Meta*. Meta: Universidad nacional abierta y a distancia (UNAD).

Conagua. (2011). Estadísticas del agua en México. *Capítulo 8 Agua en el mundo, 2011*, 115-126.

Obtenido de Conagua:

http://www.conagua.gob.mx/conagua07/contenido/documentos/sina/capitulo_8.pdf

Diaz Cuenca, E., Alvarado Granados , A., & Camacho Calzada , K. (2012). El tratamiento de agua residual doméstica para el desarrollo local sostenible: el caso de la técnica del sistema unitario de tratamiento de aguas, nutrientes y energía (SUTRANE) en San Miguel Almaya, México. *Quivera*, 78-97.

Forero, J., Ortiz, O., & Rios, F. (2005). Aplicación de procesos de oxidación avanzada como tratamiento de fenol en aguas residuales industriales de refinería. *CT&F Ciencia, Tecnología y Futuro*, 3(1), 97-109.

García, A. (2012). Criterios modernos para evaluacion de la calidad del agua para riego. *IAH*, 27-36.

Hidalgo, M., & Mejia, E. (2010). Diagnóstico de la contaminación por aguas residuales domésticas, cuenca baja de la quebrada la macana, san antonio de prado. Municipio de medellín.

IDEAM. (2006). Conductividad Electrica por el Metodo Electrometrico en Aguas. Colombia: subdirección de hidrología grupo-laboratorio de calidad ambiental.

IDEAM. (2007a). pH en Agua Por Electrometria. Colombia: subdirección de hidrología - grupo laboratorio de calidad ambiental.

IDEAM. (2007b). Demanda Quimica de Oigeno por Reflujo Cerrado y Volumetria. Colombia: subdirección de hidrología - grupo laboratorio de calidad ambiental.

- IDEAM. (2007c). Demanda Bioquímica de Oxígeno 5 días, Incubación y Eletrometría. Colombia: subdirección de hidrología - grupo laboratorio de calidad ambiental.
- IDEAM. (2007d). Tensoactivos aniónicos en agua - Metodo SAAM. Colombia.
- IDEAM. (2015). *Estudio nacional del agua 2014*. Bogotá D.C.
- Kestler, P. (2004). *Uso, reuso y reciclaje del agua residual en una vivienda*. Tesis, Guatemala.
- Lakoleva, E., & Sillanpää, M. (2013). The use of low-cost adsorbents for wastewater purification in mining industries. *Environmental Science and Pollution Research*, 20(11), 7878-7899.
- Latrach, L., Ouazzani, N., Masunaga, T., Hejjaj, A., Bouhoum, K., Mahi, M., & Mandi, L. (2016). Domestic wastewater disinfection by combined treatment using multi-soil-layering system and sand filters (MSL-SF): A laboratory pilot study. *Ecological Engineering*, 91, 294-301.
- Lavie, E., Morábito, J., Salatino, S., Bermejillo, A., & Filippini, M. (2010). Contaminación por fosfatos en el oasis bajo riego del río Mendoza. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*, 42(1), 169-184.
- Liu, J., Guo, L., Luo, X., Chen, F., & Zeng, E. (2014). Impact of anthropogenic activities on urban stream water quality: a case study in Guangzhou, China. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(23), 13412-13419.
- Lopera, M., & Campos, S. (2011). *Proyecto: Desarrollo de capacidades en el uso seguro de aguas residuales para agricultura*. Bogotá: Ministerio de agricultura y desarrollo rural.

Lopez, F. (1986). Los Geotextiles. Recuperado el 30 de 06 de 2017, de <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/6252/Article06.pdf?sequence=1>

Madera, C., Silva, J., & Peña, M. (2005). Sistemas combinados para el tratamiento de aguas residuales basados en tanque séptico - filtro anaerobio y humedales. *Ingeniería y Competitividad*, 7(2), 5-10.

Mengistie, B., Mol, A., & Oosterveer, P. (2017). Pesticide use practices among smallholder vegetable farmers in Ethiopian Central Rift Valley. *Environment, Development and Sustainability*, 19(1), 301-34.

Obregón, C. (2016a). Protocolo para la Determinación de Alcalinidad. Guajira, Colombia.

Obregon, C. (2016b). Protocolo para la Determinación de Fosfato. Guajira, Colombia.

Obregon, C. (2016c). Protocolo para la determinación de salinidad. Guajira, Colombia.

Otero, N. (2009). *Filtración de aguas residuales para reutilización*. Universidad de la Laguna.

PAVCO S.A. (06 de 2009). Manual de diseño con geosintéticos. 8. Bogotá.

Pedraza, G., Chará, J., Conde, N., Giraldo, S., & Giraldo, L. (2002). Evaluación de los biodigestores en geomembrana (pvc) y plástico de invernadero en clima medio para el tratamiento de aguas residuales de origen porcino. *Livestock Research for Rural Development*, 14(1).

Perez, C., León, M., & Delgadillo, G. (2013). Tratamiento de aguas: Manual de laboratorio.

Pérez, J. (Diciembre de 2011). Manual para determinar la calidad del agua para riego agrícola.

- Pozo, C. (2012). *Fitoremediacion de las aguas del canal de riego de Latacunga - Salcedo - Ambato mediante humedales vegetales a nivel de prototipo de campo Salcedo- Cotopaxi*. Bachelor's thesis.
- Pratt, L., & Perez, J. (1997). *Análisis de sostenibilidad de la industria del algodón en Nicaragua*. Centro Latinoamericano para la Competitividad y el Desarrollo Sostenible (CLACDS).
- Proaño, R. (2002). *Diseño y construcción de un sistema de control de PH para cama de cultivo en un invernadero*. Bachelor's thesis, Quito.
- Ramón, J., León, J., & Castillo, N. (2015). Diseño de un sistema alternativo para el tratamiento de aguas residuales urbanas por medio de la técnica de lombrifiltros utilizando la especie *Eisenia foetida*. *Revista Mutis*, 5(1), 46-54.
- Rivera, W., & Valiente, C. (2003). *Elaboracion de un filtro de aplicacion domestica para la remocion de hierro y manganeso del agua, utilizando el proceso de aireacion y contacto*. Doctoral dissertation, Universidad del salvador, El salvador.
- Rodríguez, A., Letón, P., Rosal, R., Dorado, M., Villar, S., & Sanz, J. (2006). *Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales*. Informe de vigilancia tecnológica de la Universidad de Alcalá del Círculo de Innovación en Tecnologías Medioambientales y Energía (CITME, España).
- Rodriguez, M., Jácome, A., Molina, J., & Suárez, J. (2013). Humedal de flujo vertical para tratamiento terciario del efluente físico-químico de una estación depuradora de aguas residuales domésticas. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 14(2), 223-235.

- Romero, M., Colín, A., Sanchez, E., & Ortiz, M. (2009). Tratamiento de aguas residuales por un sistema piloto de humedales artificiales: evaluación de la remoción de la carga orgánica. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 25(3), 157-167.
- Silva, J., Torres, P., & Madera, C. (2008). Reuso de aguas residuales domésticas en agricultura. Una revisión. *Agronomía Colombiana*, 26(2), 347-359.
- Tamayo, M. (2003). *El proceso de la investigacion cientifica* (4 ed.). Balderas: Limusa.
- Torres, P., Rodríguez, J., & Uribe, I. (2003). Tratamiento de aguas residuales del proceso de extracción de almidón de yuca en filtro anaerobio: influencia del medio de soporte. *Scientia et technica*, 3(23), 75-80.
- UNESCO. (2003). *water for people, water for life*. Paris: UNESCO/Mundi-Prensa Libros.
- Vera, I., Rojas, M., Chavez, W., & Arriaza, B. (2016). Evaluación de materiales filtrantes para el reuso en agricultura de aguas residuales tratadas provenientes de zonas áridas. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 26(1), 5-19.
- Wang, S., & Peng, Y. (2010). Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal*, 156(1), 11-24.

11. Anexos

Anexo 1. Registro fotográfico: Construcción del filtro



Fuente: Autores

Anexo 2. Registro fotográfico: Tratamiento de muestras de agua gris



Fuente: Autores

Anexo 3. Registro fotográfico: Tratamiento de muestras de agua gris ácida



Fuente: Autores

Anexo 4. Registro fotográfico: Tratamiento de muestras de agua gris básica



Fuente: Autores

Anexo 5. Registro fotográfico: Muestras recolectadas



Fuente: Autores